



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

DIPARTIMENTO SCIENZE AGRARIE, ALIMENTARI E FORESTALI
DOTTORATO DI RICERCA IN SCIENZE AGRARIE, ALIMENTARI FORESTALI E
AMBIENTALI

*Verifica dell'applicabilità del metodo irriguo sub-superficiale su colture
agrumicole e ottimizzazione dell'uso della risorsa idrica*

Dottorando

Dott. Loris Franco

Coordinatore: Vincenzo Bagarello

Tutor: Prof. Giuseppe Provenzano

Co-Tutor: Prof. Antonio Motisi

Ciclo XXXII

A.A. 2018-2019

Indice

Indice.....	I
Elenco delle figure	III
Elenco delle tabelle	IX
Lista dei simboli.....	XI
Elenco degli acronimi.....	XIV
Sommario dei risultati conseguiti.....	XV
Abstract	- 1 -
1. Introduzione	- 5 -
1.1 Prospettive e limitazioni della subirrigazione	- 8 -
1.2 Monitoraggio e modellazione del sistema Suolo-Pianta-Atmosfera (SPA).....	- 13 -
2. Obiettivi della tesi	- 27 -
3. Materiali e metodi	- 29 -
3.1. Layout sperimentale delle prove in vaso.....	- 29 -
3.2 Installazione sperimentale di pieno campo	- 34 -
3.3 Prove sui gocciolatori.....	- 54 -
3.3.1. Caratterizzazione idraulica.....	- 54 -
3.3.2 Effetti dell'intrusione radicale sulle performance dei gocciolatori.....	- 58 -
4. Risultati e discussione	- 61 -
4.1 Prove in vaso	- 61 -
4.2 Caratterizzazione dell'area e monitoraggio dello stato idrico del sistema SPA	- 74 -
4.3. Valutazione in campo delle performance dei gocciolatori.....	- 121 -
Appendice: Confronto di diversi metodi di stima della densità di flusso.	- 126 -
Conclusioni.....	- 137 -
Bibliografia.....	- 141 -

Elenco delle figure

- Figura 1.2.1.** Schematizzazione del Continuo-Suolo-Pianta atmosfera (SPA) ed analogia con un circuito elettrico.
- Figura 1.2.2.** Sistema TDR per la misura dei contenuti idrici del suolo.
- Figura 1.2.3.** Sonda Enviroscan (a); sonda “drill & drop”TM(b).
- Figura 1.2.4.** Schema di funzionamento dello psicrometro (a) e relativo sensore (b).
- Figura 3.1.1.** Installazione campo sperimentale: a) contenitori per la crescita indipendente delle radici b) posizione delle ali gocciolanti con principio attivo anti-radice (A-Rt-Ag) e senza (controllo con barriera fisica, C).
- Figura 3.1.2.** Layout sperimentale e sistema di irrigazione; 1) valvole di sfiato; 2) manometro; 3) contatore volumetrico; 4) filtro a dischi e programmatore di irrigazione.
- Figura 3.1.3.** Fasi del trapianto: a) pianta dopo la pulitura dell'apparato radicale; b) potatura delle radici e della parte aerea; c) trapianto in vaso.
- Figura 3.1.4.** Fasi di misura della vegetazione e dell'apparato radicale al termine del biennio di indagine: a) sviluppo della parte aerea della pianta; b) pianta dopo la misura della porzione aerea della vegetazione; c) Pianta dopo la pulizia dell'apparato radicale.
- Figura 3.1.5.** Sistema di monitoraggio della presenza di radici tramite minirizotrone: a) vaso con tubi in plexiglas per le ispezioni; b) particolare della fotocamera e dell'illuminazione del minirizotrone; c) geometria di acquisizione delle immagini tramite la fotocamera; d) correzione dell'illuminazione.
- Figura 3.2.1.** Area ad alta vocazione agrumicola, “Conca d'Oro”, nei pressi di Palermo (a); irrigazione tradizionale a spruzzo sotto chioma (b).
- Figura 3.2.2.** Installazione sperimentale di pieno campo. Sono indicati gli otto settori irrigui con i diversi modelli di erogatore (Cu, C, R1 ed R2), nonché i sensori per il rilievo dello stato idrico del suolo (punti in verde). E' altresì indicata la posizione della stazione climatica (punto in blue) e la torre per la misura dei flussi evapotraspirativi secondo la tecnica Eddy Covariance (punto in giallo).
- Figura 3.2.3.** Misura delle caratteristiche fisiche del suolo; a) mappa di campionamento: in rosso i campioni superficiali 0-15cm, in giallo i profili pedologici, in verde i punti di campionamento nei pressi dei sensori di umidità; b) profilo di suolo; c) prelievo di campioni indisturbati di suolo, a diversa profondità, lungo i profili.
- Figura 3.2.4.** Strumenti di monitoraggio del sistema SPA installati in campo; a) stazione metereologica; b) schema di installazione dei sensori di contenuto idrico e temperatura del suolo “drill & drop”TM.
- Figura 3.2.5.** Strumenti di misura del potenziale idrico della pianta; a) camera pressiométrica di Scholander; b) psicrometro PSY1 ICT International.
- Figura 3.2.6.** Schermata del software di gestione del sensore PSY1 e curva di calibrazione ottenuta mediante la misura di una porzione di carta assorbente imbevuta con soluzioni a concentrazione nota.

- Figura 3.2.7.** Fasi dell'installazione in campo del sensore PSY1. Esposizione del legno, posizionamento della termocoppia; applicazione del grasso di silicone; installazione tramite staffa in policarbonato; isolamento termico del sensore.
- Figura 3.2.8.** Installazione dei sensori *sap-flow*; a) schema di funzionamento; b) installazione delle sonde; c) sistema di isolamento delle sonde.
- Figura 3.2.9.** Circuito stampato della stazione di acquisizione dati dei *sap-flow*.
- Figura 3.2.10** Schema elettrico delle componenti dell'amplificazione del segnale (a); schema elettrico del regolatore di tensione utilizzato per l'alimentazione del riscaldatore delle sonde.(b).
- Figura 3.2.11.** Andamento temporale del segnale proveniente dal sensore, con cicli di 10 minuti con riscaldatore acceso e 10 minuti con riscaldatore spento. In rosso sono riportate le fasi stazionarie del ciclo.
- Figura 3.2.12.** Campione di tre transitori, OFF - ON - OFF, ciascuno rappresentato con un colore diverso. Per ognuno è indicata l'estrapolazione fino al raggiungimento dello stadio stazionario (linea tratteggiata). SR, residuo di segnale, differenza tra l'ultimo ΔT misurato e ΔT estrapolato; $\Delta T_{ON_i}^E$,transiente ON estrapolato; $\Delta T_{OFF_{i-1}}^E$ e $\Delta T_{OFF_{i+1}}^E$ transiente OFF estrapolato; t, time. (Lubczynski et al. 2012).
- Figura 3.2.13.** Rilievi morfologici sulla pianta. a) misura delle parti strutturali della pianta; b) elaborazione volume e area della pianta con il software FV2200; c) acquisizione immagini per la determinazione della superficie fogliare asportata tramite potatura.
- Figura 3.2.14.** Rilievo sullo sviluppo vegetativo estivo: a) sviluppo della vegetazione estiva, verde chiaro, in FI; b) misura della lunghezza di un germoglio estivo.
- Figura 3.3.1.** Schema banco prova ISO 9261:2010; 1) vasca di accumulo; 2) termometro digitale; 3) pompa e variatore di velocità; 4) valvola di regolazione; 5) vasca di ricircolo con pompa; 6) contenitore con bilance di precisione; 7) filtro a dischi 130 Mesh (100 μm); 8) sfiati; 9) manometro digitale; 10) sistema pneumatico di apertura e chiusura valvole; 11) centralina di controllo; 12) filtro a dischi.
- Figura 3.3.2.** Impianto sperimentale per la misura delle perdite di carico; 1) vasca di accumulo; 2) termometro digitale; 3) pompa e variatore di velocità; 4) filtro a dischi 130 Mesh (100 μm); 5) sfiati; 6) misuratore di portata; 7) attacco porta-manometro P1; 8) manometro digitale; 9) manometro differenziale digitale; 10) manometro differenziale ad acqua; 11) attacco porta-manometro P2; 12)valvole di regolazione; 13) centralina di controllo.
- Figura 3.3.3.** Banco prova utilizzato per caratterizzazione idraulica dei gocciolatori precedentemente installati in vaso. a) particolare della strumentazione; b) cella per l'accumulo dei volumi e la misura delle portate erogate.
- Figura 3.3.4.** Strumenti utilizzati per il rilievo delle radici all'interno del gocciolatore. a) microscopio elettronico; b) strumenti utilizzati per la rimozione della tubazione di polietilene; c) gocciolatore con film di PE; d) parte interna del gocciolatore completamente esposta.
- Figura 4.1.1.** Immagini rilevate con minirizotrone durante il triennio di indagine. Sono riportate per le tesi Controllo, Cu, CY1, R1, le immagini rilevate alle date indicate nella posizione Nord della parte del vaso

contenente i gocciolatori di controllo e quelli contenenti il principio attivo anti-radice (Cu, CY1 ed R1).

Figura 4.1.2. Confronto tra le curve Q (P) ottenute per i gocciolatori Controllo, CY1 e CY2 prima e dopo il test. La linea continua rappresenta il valore medio dei gocciolatori prima del test con la relativa deviazione standard associata; le stelle indicano i casi in cui è stata rilevata l'intrusione radicale all'interno gocciolatore.

Figura 4.1.3. Confronto tra le curve Q (P) ottenute per i gocciolatori CU, R1 e R2 prima e dopo il test. La linea continua rappresenta il valore medio dei gocciolatori prima del test con la relativa deviazione standard associata; le stelle indicano i casi in cui è stata rilevata l'intrusione radicale all'interno gocciolatore.

Figura 4.1.4. Per ogni modello di gocciolatore sono mostrate un'immagine del foro di erogazione prima della prova di caratterizzazione idraulica e una foto dopo l'esposizione della parte interna del gocciolatore. I cerchi rossi indicano i punti del gocciolatore in cui si sono verificate occlusioni severe.

Figura 4.2.1. Curve granulometriche dei campioni prelevati alla profondità di 0-20 cm nelle tesi FI, DI e TI.

Figura 4.2.2. Triangolo tessiturale USDA. I punti all'interno del grafico identificano la classe tessiturale dei campioni prelevati nello strato superficiale (0-20 cm) delle diverse tesi irrigue.

Figura 4.2.3. Distribuzione spaziale delle percentuali di argilla, limo e sabbia sulle tesi TI, FI e DI.

Figura 4.2.4. Percentuale in peso delle particelle con $d > 0,2$ mm presenti nei profili campionati, per le distinte profondità di campionamento.

Figura 4.2.5. Curve granulometriche dei campioni prelevati alle diverse profondità nella tesi TI.

Figura 4.2.6. Curve granulometriche dei campioni prelevati alle diverse profondità nelle tesi FI.

Figura 4.2.7. Curve granulometriche dei campioni prelevati alle diverse profondità nelle tesi DI.

Figura 4.2.8. Curve granulometriche e relative curve di ritenzione ottenute sui campioni di suolo indisturbato prelevato, a diversa profondità, lungo i profili aperti in corrispondenza delle tesi FI e DI.

Figura 4.2.9. Dinamica temporale della temperatura T, [°C], dell'umidità relativa dell'aria RH [%], della radiazione solare R_s , [MJ/m²/d], della velocità del vento media giornaliera [km/h], delle altezze di pioggia [mm] e dell'evapotraspirazione di riferimento, ET_0 [mm/d] nel secondo semestre del 2017, nel 2018 e nel 2019. I e RDI indicano rispettivamente la stagione irrigua ed il periodo di applicazione del deficit idrico.

Figura 4.2.10. Dinamica temporale del contenuto idrico (θ) misurato a diverse profondità. Sono riportati i dati registrati dai sensori FI1 e DI2 nel periodo 1 giugno - 30 settembre per i tre anni di osservazione.

Figura 4.2.11. Dinamica temporale dei profili di umidità misurati prima e dopo un adacquamento effettuato con il metodo tradizionale a spruzzo, TI, nel 2017, e mediante subirrigazione, SDI, nel 2018.

Figura 4.2.12. Profili di umidità in funzione del tempo per tutte le sonde installate, misurati prima e dopo un evento di pioggia intenso della durata di due ore (39,9 mm).

Figura 4.2.13. Box-plot relativi al volume delle piante, all'area di proiezione della chioma e all'indice di area fogliare (LAI) nelle tesi irrigue DI e FI. I punti presenti identificano gli outlier. Le medie con la stessa lettera indicano differenze non significative tra le tesi ($P < 0,05$).

- Figura 4.2.14.** Box-plot relativi al volume delle piante, all'area di proiezione della chioma e al LAI, rilevati nelle porzioni di pianta esposte ad Est (E), Nord (N), Ovest (O) e Sud (S). I punti indicano gli eventuali outlier. Le medie con la stessa lettera non sono significativamente differenti per ($P < 0,05$).
- Figura 4.2.15.** Dinamica temporale dei valori medi e delle relative deviazioni standard dei potenziali idrici predawn e midday misurati nel 2018 e 2019 sulle tesi irrigate con sistema tradizionale (TI) e mediante subirrigazione, con rifornimento idrico ottimale (FI) ed in condizioni di deficit (DI). Le linee verticali rappresentano il periodo di applicazione delle condizioni di deficit idrico.
- Figura 4.2.16.** Relazioni tra il valor medio del contenuto idrico del suolo, θ [cm^3/cm^3] nello strato 0-50 cm, ed il potenziale idrico predawn, ψ_{pd} [MPa]. Le linee tratteggiate indicano i valori soglia nei quali si osserva il cambio della pendenza della relazione $\psi_{pd}(\theta)$.
- Figura 4.2.17** Relazione tra potenziale idrico misurato all'alba (ψ_{pd}) e quello misurato nelle ore centrali della giornata (ψ_{stem}).
- Figura 4.2.18** Dinamica temporale del potenziale ψ [MPa], misurati mediante il sensore PSI1 e tramite la camera a pressione nella tesi, FI3, DI2 durante il mese di ottobre. I valori dell'evapotraspirazione di riferimento, ETo [mm/h] sono inoltre riportati.
- Figura 4.2.19** Dinamica temporale del potenziale ψ [MPa], misurati mediante il sensore PSI1 e tramite la camera a pressione nella tesi, FI 3e DI 2. I valori dell'evapotraspirazione di riferimento, ETo [mm/h] sono inoltre riportati.
- Figura 4.2.20** Dinamica temporale del potenziale ψ [MPa], misurati mediante il sensore PSI1 e tramite la camera a pressione nella tesi ,FI 3e DI 2 il 29 e 30/07/2019 . I valori dell'evapotraspirazione di riferimento, ETo [mm/h] sono inoltre riportati.
- Figura 4.2.21** Andamento temporale della densità di flusso oraria, u , misurata dai sensori posizionati nella parte Nord e Sud del tronco (FI1 e DI1) e della branca sud (FI3 e DI3), e dell'evapotraspirazione oraria di riferimento ETo .
- Figura 4.2.22.** Andamento temporale della densità di flusso oraria, u , misurata dai sensori posizionati sul tronco (FI1 e DI1) e dell'evapotraspirazione oraria di riferimento ETo .
- Figura 4.2.23.** Andamento temporale della densità di flusso oraria, u , misurata dai sensori posizionati sulla branca (FI3 e DI3) e dell'evapotraspirazione oraria di riferimento ETo .
- Figura 4.2.24.** Densità di flusso orario, u , in funzione dell'evapotraspirazione di riferimento orario, ETo . Rappresentati in base alla posizione sul tronco (FI1 e DI1), sulla branca (FI3 e DI3) e congiuntamente.
- Figura 4.2.25** Densità di flusso giornaliero in funzione del contenuto idrico medio dello strato di suolo 0-50 cm, per prefissati valori giornalieri di ETo , nelle tesi FI1 e DI1.
- Figura 4.2.26** Densità di flusso giornaliero in funzione del contenuto idrico medio dello strato di suolo 0-50 cm, per prefissati valori giornalieri di ETo , nelle tesi FI3 e DI3.
- Figura 4.2.27.** Densità di flusso giornaliero in funzione dell'evapotraspirazione di riferimento giornaliera ETo,d , per prefissati θ , nelle tesi FI1 e DI1.

- Figura 4.2.28.** Densità di flusso giornaliero in funzione dell'evapotraspirazione di riferimento giornaliera $ET_{o,d}$, per prefissati θ , nelle tesi FI3 e DI3.
- Figura 4.2.29.** Andamento temporale dell'evapotraspirazione effettiva, $ET_{c,act}$, dell'evapotraspirazione di riferimento $ET_{o,d}$ e dei contenuti idrici medi dello strato di suolo 0-50 cm registrati nella tesi FI1, FI3, DI1 e DI3.
- Figura 4.2.30.** Andamento temporale del $K_{cb}K_s$, per le due diverse gestioni irrigue FI e DI.
- Figura 4.2.31** Andamento temporale per i mesi di luglio e agosto 2019, della densità di flusso, u [cm/min], misurata dai sensori posizionati sulle branche Nord e Sud nelle tesi FI3 e DI2, e dell'evapotraspirazione oraria di riferimento ET_o [mm/h].
- Figura 4.2.32.** Densità di flusso, u , in funzione dell'evapotraspirazione di riferimento, ET_o . Per le tesi FI3 e DI2 sono riportate le misure associate alla branca nord e sud della pianta.
- Figura 4.2.33.** Andamento temporale dell'evapotraspirazione effettiva, $ET_{c,act}$, nelle tesi FI3, DI2. L'evapotraspirazione di riferimento, $ET_{o,d}$, ed i contenuti idrici medi dello strato di suolo 0-50 cm, θ , sono inoltre riportati.
- Figura 4.2.34.** Andamento temporale del $K_{cb}K_s$, per le due diverse gestioni irrigue FI e DI.
- Figura 4.3.1.** Relazione tra la pressione di esercizio e la portata erogata ottenuta secondo lo standard ISO 9261:2010 su 25 gocciolatori nuovi, delle ali gocciolanti installate in pieno campo. I valori del coefficiente di variabilità in funzione della portata di esercizio sono inoltre riportati.
- Figura 4.3.2.** Relazione tra perdite di carico e lunghezza della condotta per i due differenti modelli di ali gocciolati installate in campo. La linea tratteggiata individua la lunghezza massima delle condotte in campo.
- Figura 4.3.3.** Pressione all'ingresso del settore irriguo durante il periodo di studio. Per ogni principio attivo anti-radice utilizzato (CU, R1 e R2) e il controllo (C) sono riportati i dati della tesi gestita in irrigazione deficitaria (DI) e in piena irrigazione (FI).
- Figura 4.3.4.** Portata media dei gocciolatori in funzione delle ore di funzionamento. Per ogni principio attivo anti-radice utilizzato (CU, R1 e R2) e il controllo (C) sono riportati i dati della tesi gestita in irrigazione deficitaria (DI) e in piena irrigazione (FI). Le linee nere spesse indicano le portate medie, dei gocciolatori nuovi ottenute secondo la norma ISO 9261:2010 alla pressione di 150 kPa.
- Figura A.1.** Andamento temporale di ΔT misurato durante i cicli di riscaldamento (ON) e raffreddamento (OFF), separati in considerazione della presenza (Giorno) o assenza di flusso (Notte).
- Figura A.2** Andamento temporale di ΔT registrato alla fine della fase del ciclo con riscaldatore spento (OFF) ed relativo valore estrapolato secondo la procedura proposta da Lubczynski et al., 2012.
- Figura A.3.** Andamento temporale di ΔT registrato alla fine della fase del ciclo con riscaldatore acceso (ON) ed relativo valore estrapolato secondo la procedura proposta da Lubczynski et al., 2012.
- Figura A.4.** Frequenza percentuale dei valori del gradiente termico naturale (NTG) misurati durante il ciclo con riscaldatore spento (OFF) secondo la procedura proposta da Lubczynski et al., 2012, durante il giorno e la notte.

Figura A5. Andamento giornaliero della densità di flusso, u , stimata a partire dagli stesso data set, con le metodologie proposte da: Granier, 1985; Isarangkool Na Ayutthaya et al., 2010; Lubczynski et al., 2012; Do et al., 2018.

Figura A.6. Andamento temporale della traspirazione effettiva della branca, $T_{c_{act}}$, calcolato secondo le metodologie proposte da Granier (1985), Lubczynski et al. (2012) e Do et al. (2018), utilizzando i dati registrati nella tesi DI2 N Branca.

Elenco delle tabelle

- Tabella 4.1.1.** Medie e deviazioni standard del diametro del colletto (DC), del diametro della sezione di potatura del fusto (DF) e del peso fresco delle piante private della vegetazione e di parte delle radici (P).
- Tabella 4.1.2.** Dati vegetativi medi e relative deviazioni standard dopo il periodo di sperimentazione. Per ogni gruppo di piante trattate con differente principio attivo (A-Rt-Ag) sono indicati il peso secco totale della nuova crescita (NC), il peso secco totale della pianta (P), e le medie dei rapporti NC/P e tra foglie(F) e radici assorbenti (R_T) F/R_T . Le medie con le stesse lettere non sono significativamente differenti per ($P < 0,05$).
- Tabella 4.1.3.** Medie e deviazioni standard associate al peso secco delle radici cresciute nelle due porzioni dei vasi; la prima delle quali contenente gocciolatori senza principio attivo (C) e la seconda con gocciolatori con il principio attivo anti-radice (A-Rt-Ag). Le radici sono state separate in assorbenti con diametro < 2 mm (R_{AS}), secondarie con diametro > 2 mm (R_{SE}) e totali (R_T). La media e le deviazioni standard dei rapporti tra i dati dei ottenuti nelle due porzioni dei contenitori e altresì indicato (A-Rt-Ag/C).
- Tabella 4.1.4.** Medie, deviazioni standard e coefficienti di variabilità delle portate, alla pressione di 150 kPa, per i diversi A-Rt-Ag all'inizio (Q_{mi}) ed alla fine (Q_{fin}) delle prove in vaso. Le riduzioni percentuali di portata ($\Delta\theta$) sono altresì indicate.
- Tabella 4.1.5.** Percentuale di gocciolatori con presenza di radici sul totale del campione ($R_{\%}$), lunghezze totali, medie e deviazioni standard delle radici cresciute all'interno dei gocciolatori senza principio attivo (C) e con il principio attivo anti-radice (A-Rt-Ag).
- Tabella 4.2.1** Coordinate GPS dei punti di campionamento dello strato superficiale (0-20 cm) e percentuale in peso dello scheletro con diametro > 2 mm (P), del contenuto di argilla (A), limo (L) e sabbia (S). La classe tessiturale, secondo la classificazione USDA è altresì riportata.
- Tabella 4.2.2.** Medie, valori minimi e massimi delle percentuali in peso dello scheletro con diametro > 2 mm (P), del contenuto di argilla (A), limo (L) e sabbia (S).
- Tabella 4.2.3.** Analisi granulometriche dei campioni prelevati nelle tesi TI, FI e DI, a diverse profondità e in prossimità dei sensori "drill & dropTM". Per ciascuna profondità sono indicate la percentuale in peso del campione con diametro > 2 mm (Sc) e delle componenti argilla (A), limo (L) e sabbia (S) espresse secondo la classificazione USDA.
- Tabella 4.2.4.** Parametri delle curve di ritenzione, espressi secondo il modello di van Genuchten (1980), ottenuti alle diverse profondità nelle tesi FI e DI.
- Tabella 4.2.5.** Altezze di pioggia (P), evapotraspirazione potenziale (ET_o) e deficit pluviometrico (P-ET_o), per le diverse tesi irrigue, nei tre anni di osservazione. Il volume irriguo stagionale per pianta (V_{tot}) e il risparmio irriguo (RI) rispetto alla tesi TI sono altresì riportati.

- Tabella 4.2.6.** Sintesi delle irrigazioni effettuate per le varie tesi irrigue nel triennio 2017-2019. Sono riportati il numero di adacquamenti (N), le ore di irrigazione (H), la portata media per pianta (Q_{med}), il volume totale stagionale per pianta (V_{tot}) ed il risparmio idrico conseguito nelle tesi FI e DI rispetto a TI.
- Tabella 4.2.7.** Diametri delle varie parti della pianta, misurati al colletto (Col.), nel punto di innesto (Inn.), all'imbracatura (Imb.) e sulle branche primarie (Br I) e secondarie (Br II). Per le branche sono riportati il numero, i diametri medi e le relative deviazioni standard.
- Tabella 4.2.8.** Misure sulla vegetazione asportata durante l'intervento di potatura eseguito, nelle tesi FI e DI, nella primavera 2019. Sono riportate le medie e le deviazioni standard associate del peso secco del legno (L_T), del totale delle foglie (F_T) e di un campione di 50 foglie (F_{50}). Le medie e le deviazioni standard associate della superficie fogliare per grammo di peso secco di foglie (SF_{50}/F_{50}) e il totale della superficie fogliare asportata (SF_T) sono inoltre riportati.
- Tabella 4.2.9.** Periodo di fioritura ed allegagione e sviluppo della vegetazione durante il biennio di osservazione. Il periodo di raccolta è altresì indicato.
- Tabella 4.2.10.** Numero (N), percentuale di germogliamento estivo (GE), medie e deviazioni standard della lunghezza dei germogli (L_g), campionati nelle diverse tesi irrigue e differenziati per esposizione (nord e sud), alla fine del flusso vegetativo (FV) primaverile (Prim) ed estivo (Est).
- Tabella 4.3.1.** Numero di piante per settore (P), lunghezza totale delle ali gocciolanti installate (L) e numero di gocciolatori (G), stimati considerando il sesto di impianto e misurati in campo. La differenza tra il valore stimato e misurato dei gocciolatori è inoltre riportato (ΔG).
- Tabella. A.1.** Sintesi dei parametri e delle principali equazioni utilizzate nei diversi metodi di stima della densità di flusso, u , applicati agli stessi dati. Per ogni metodologia sono riportate le equazioni per il calcolo dei vari coefficienti termici (K , K_L , K_2) e quelle relative al calcolo della densità di flusso, u .
- Tabella. A.2.** Numero di stime dei parametri A1, A2, A3 e T3, eseguite seguendo la procedura di Lubczynski et al., 2012, con individuazione di una soluzione (*Fit*), e senza individuazione di una soluzione (*No Fit*) e percentuale delle stime con soluzione ($Fit_{\%}$) sul totale delle stime eseguite. I dati sono separati per tenere in conto il periodo del giorno (Giorno; Notte) ed il ciclo con riscaldatore acceso (ON) o spento (OFF).
- Tabella A.3.** Media e deviazione standard dei valori assunti dai parametri A1, A2, A3, T1, T2 e T3, adottati nell'equazione per la stima della fase stazionaria dei cicli di riscaldamento (ON) e raffreddamento (OFF), separati in considerazione della presenza (Giorno) o assenza di flusso (Notte).

Lista dei simboli

Simbolo	Descrizione	Unità di misura
ψ_s	Potenziale idrico del suolo	[MPa]
Ψ_r	Potenziale idrico radicale	[MPa]
Ψ_x	Potenziale idrico xilematico	[MPa]
Ψ_l	Potenziale idrico fogliare	[MPa]
Ψ_{atm}	Potenziale idrico dell'atmosfera	[MPa]
r_s	Resistenza suolo	
r_r	Resistenza radicale	
r_{pi}	Resistenza portinnesto	
r_{st}	Resistenza del fusto	
r_l	Resistenza fogliare	
ϵ	Costante dielettrica	[-]
ϵ_b	Costante dielettrica apparente del suolo	[-]
U	Contenuto idrico gravimetrico	[g/g]
θ	Contenuto idrico volumetrico	[cm ³ /cm ³]
ρ_b	Massa volumica apparente del suolo	[g/cm ³]
ρ_w	Densità dell'acqua	[g/cm ³]
Q_t	Quantità di luce che arriva sotto la chioma	[W/m ²]
Q_o	Luce incidente	[W/m ²]
k	Coefficiente di estinzione della radiazione luminosa	[-]
$T(\vartheta, \alpha)$	Gap fraction per un intervallo di angoli zenitali ϑ e di angoli azimutali α	[-]
P_s	Frazione di cielo in una regione (ϑ, α)	[-]
P_{ns}	Frazione di vegetazione in una regione (ϑ, α)	[-]
$D_{r,i}$	Deplezione nel giorno i-esimo	[mm]
P_i	Altezza della precipitazione nel giorno i-esimo	[mm]
RO_i	Deflusso superficiale nel giorno i-esimo	[mm]
$I_{e,i}$	Irrigazione efficace nel giorno i-esimo	[mm]
CR_i	Apporto idrico per risalita capillare da falda sotterranea nel giorno i-esimo	[mm]
DP_i	Perdita di acqua per percolazione nel giorno i-esimo	[mm]
$ET_{e,i}$	Evapotraspirazione effettiva della coltura nel giorno i-esimo	[mm]
θ_{cc}	Contenuto idrico alla capacità di campo	[cm ³ /cm ³]
θ_{pa}	Contenuto idrico corrispondente al punto di appassimento	[cm ³ /cm ³]
z_r	Profondità delle radici	[m]
$ET_{o,d}$	Evapotraspirazione di riferimento giornaliera	[mm/ giorno]
Δ	Pendenza della curva della pressione di vapore saturo	[kPa/°C]
R_n	Flusso della radiazione netta	[MJ/m ² /giorno]
G_o	Flusso di calore dal suolo	[MJ/m ² /giorno]
$e_s - e_a$	Deficit di pressione di vapore dell'aria	[kPa]
γ	Costante psicrometrica dell'aria	[kPa/°C]
T_a	Temperatura media dell'aria	[°C]
u_2	Velocità del vento rilevata ad un'altezza di due metri dal suolo	[m/s]
ET_c	Evapotraspirazione colturale	[mm/ giorno]

K_c	Coefficiente colturale	[-]
K_{cb}	Coefficiente colturale basale	[-]
K_e	Coefficiente di evaporazione dell'acqua dal suolo	[-]
K_s	Coefficiente di stress idrico	[-]
$ET_{c\ adj}$	Evapotraspirazione corretta per la componente di stress idrico	[mm/ giorno]
Ψ_{pd}	Potenziale della pianta misurato all'alba	[MPa]
Ψ_{stem}	Potenziale della pianta misurato a mezzogiorno	[MPa]
ΔT	Differenza di temperatura	[°C]
u	Densità di flusso	[cm/min]
dT	Transiente termico del segnale	[°C]
ΔT_c	Differenza di temperatura alla fine del ciclo di raffreddamento	[°C]
ΔT_h	Differenza di temperatura alla fine del ciclo di riscaldamento.	[°C]
dT_o	Transiente termico registrato in assenza di flusso	[°C]
dT_u	Transiente termico attuale	[°C]
K	Indice termico	[-]
K_2	Indice termico	[-]
K_L	Indice termico	[-]
$\Delta T_{ON\ max}^c$	Differenza di temperatura ottenuta in condizioni di assenza di flusso corretta per il gradiente termico naturale	[°C]
$\Delta T_{ON\ i}^c$	Differenza di temperatura corretta per il gradiente termico naturale	[°C]
$\Delta T_{ON\ i}^E$	Differenza di temperatura ottenuta per estrapolazione dei dati fino al raggiungimento della fase stazionaria durante il ciclo di riscaldamento	[°C]
$\Delta T_{NGT\ i}^E$	Differenza di temperatura ottenuta per estrapolazione dei dati fino al raggiungimento della fase stazionaria durante il ciclo di raffreddamento che rappresenta il gradiente termico naturale	[°C]
$\Delta T_{OFF\ i}^E$	Differenza di temperatura ottenuta per estrapolazione dei dati fino al raggiungimento della fase stazionaria durante il ciclo di riscaldamento	[°C]
Q_i	Portata, misurata all'inizio della condotta	[m ³ /h]
P_i	Pressione misurata all'inizio della condotta	[kPa]
μ	Media	
σ	Deviazione standard	
DC	Diametro del colletto	[cm]
DF	Diametro della sezione di potatura del fusto	[cm]
P	Peso della pianta	[g]
NC	Peso della nuova crescita	[g]
F	Peso delle foglie	[g]
R_T	Peso delle radici	[g]
R_{AS}	Peso delle radici assorbenti	[g]
R_{SE}	Peso delle radici secondarie	[g]
Q_{ini}	Portata iniziale dei gocciolatori a nuovo	[l/h]
Q_{fin}	Portata finale dei gocciolatori dopo la prova	[l/h]
$R_{\%}$	Percentuale di radici rilevate nel campione	[%]
A	Percentuale di argilla	[%]
L	Percentuale di limo	[%]

S	Percentuale di sabbia	[%]
Sc	Percentuale di scheletro	[%]
h	Potenziale matriciale	[cm]
θ	Contenuto idrico del suolo	[cm ³ /cm ³]
θ_s	Contenuto idrico del suolo alla saturazione	[cm ³ /cm ³]
θ_r	Contenuto idrico residuo del suolo	[cm ³ /cm ³]
T	Temperatura giornaliera	[°C]
RH	Umidità relativa dell'aria	[%]
Rs	Radiazione solare	[MJ/m ² /d]
N	numero di adacquamenti	[-]
H	ore di irrigazione	[h]
Q _{med}	portata media per pianta	[l]
V _{tot}	volume totale stagionale per pianta	[%]
RI	Risparmio Irriguo	[%]
L _T	Peso totale legno di potatura	[g]
F _T	Peso totale foglie asportate con la potatura	[g]
F ₅₀	Peso campione di 50 foglie	[g]
SF ₅₀	Superficie fogliare campione di 50 foglie	[m ²]
SF _T	Superficie fogliare totale asportata con la potatura	[m ²]
L _g	Lunghezza germogli	[cm]
\overline{ET}_{act}	Evapotraspirazione effettiva della coltura	[mm/d]
T_{act}	Traspirazione effettiva della coltura	[mm/d]

Elenco degli acronimi

Acronimo	Descrizione
FAO	Food and Agriculture Organization
SDI	Subsurface drip irrigation; subirrigazione
DI	Deficit idrico
ICT	Information communication technology; tecnologie dell'informazione e della comunicazione
SPA	Sistema Suolo Pianta Atmosfera
LAI	Leaf Area Index,
RDI	Regulate deficit irrigation
A-Rt-Ag	Anti Roots Agents, principi attivi anti intrusione radicale
NS	Neutron Scattering
TDR	Time Domain Reflectometry ,Riflettometria nel Dominio del Tempo
FDR	Frequency Domain Reflectometry, Riflettometria nel dominio delle frequenze
CTD	Metodo di misura dei flussi traspirativi con dissipazione termica costante
TTP	Metodo di misura dei flussi traspirativi con dissipazione termica intermittente
TAW	Acqua totale disponibile per la coltura
CY1	Principio attivo anti intrusione radicale: Cianammide alla concentrazione dello 1,25%
CY2	Principio attivo anti intrusione radicale: Cianammide alla concentrazione dello 1,25%
R1	Principio attivo anti intrusione radicale: Trifluralin
R2	Principio attivo anti intrusione radicale: Preventol
PB	Barriera fisica contro l'intrusione radicale
SF	<i>Sap-flow</i> , flusso linfatico
NC	Nuova crescita; nuova vegetazione aerea e radicale emessa dalla pianta
TI	Tesi irrigua con sistema tradizionale a spruzzo utilizzato in azienda
FI	Tesi irrigua mantenuta in assenza di deficit idrico
DI	Tesi in cui è prevista l'applicazione di condizioni di deficit idrico controllato
GPS	Global Positioning System
USDA	United States Department of Agriculture
Col.	Colletto
Inn.	Innesto
Imb.	Imbrancatura
Br I	Branche Primarie
Br II	Branche secondarie
GE	Germogliamento estivo
FV	Flusso vegetativo

Sommario dei risultati conseguiti

La tecnica della subirrigazione (SDI), applicata in assenza di deficit idrico della pianta, consente riduzioni dei volumi stagionali del 12-14% rispetto ai tradizionali impianti a spruzzo.

Condizioni di deficit idrico controllato (DI) associate alla subirrigazione permettono di conseguire, rispetto alla gestione tradizionale, un risparmio idrico stagionale intorno al 40%.

L'irrigazione deficitaria limita lo sviluppo vegetativo estivo, influenzando la biomassa futura della pianta.

Il monitoraggio dello stato idrico del suolo e della pianta consente di identificare i parametri di gestione irrigua.

Il contenuto di argilla e la presenza di scheletro nel suolo modica la risposta del sensore di umidità, che pertanto richiede calibrazione sito-specifica.

Le misure di *sap-flow* con sonde a dissipazione termica (Granier) hanno permesso stime affidabili dei flussi traspirativi a scala oraria e giornaliera.

Valori del potenziale predawn inferiori a $\psi_{pd} \sim -0,45 \div -0,50$ MPa determinano l'insorgenza di condizioni di stress idrico.

In corrispondenza di $\psi_{pd} = -0,45 \div -0,50$ MPa sono stati rilevati valori di ψ_{stem} tra -1,2 e -1,4 MPa.

Riduzioni della traspirazione effettiva rispetto alla potenziale sono stati rilevati per contenuti idrici del suolo inferiori al 20-25%.

Nel periodo di applicazione del deficit irriguo i flussi traspirativi in DI sono sempre inferiori ai corrispondenti misurati in FI.

Nelle condizioni esaminate il valore del coefficiente colturale basale, K_{cb} , durante la stagione irrigua è risultato pari a 0,40 nel 2018 e nel 2019.

L'applicazione del DI ha determinato nei due anni valori del coefficiente di stress, K_s , pari a 0,75 (2018) e 0,57 (2019).

L'uso dei diversi principi attivi anti-intrusione radicale non influenza lo sviluppo vegetativo di piante di agrume su portinnesto di *citrange* 'Carrizo'.

L'uso di un minirizotrone, realizzato allo scopo, ha permesso il monitoraggio visivo della crescita radicale in prossimità degli erogatori.

Principi attivi allelopatici quali la cianammide o erbicidi come il Preventol rallentano la crescita delle radici nell'intorno dell'erogatore.

Fenomeni di invecchiamento dei gocciolatori e di intrusione radicale si sono verificati già dopo due anni di utilizzo in vaso.

La presenza delle radici, all'interno dei gocciolatori auto-compensanti, non ha limitato la funzionalità, ma ha incrementato la variabilità delle portate erogate.

Forma e dimensioni del percorso idraulico interno all'erogatore ne condizionano la suscettibilità all'occlusione.

I potenziali idrici rilevati dagli psicrometri e quelli misurati con camera di Scholander hanno rivelato una generale concordanza. Le limitate differenze potrebbero essere ascritte a fenomeni di embolia vascolare conseguenti al prolungato deficit idrico.

Abstract

Gli impianti di subirrigazione (SDI), in relazione alla posizione interrata dei gocciolatori permettono la riduzione dei consumi irrigui, garantendo la possibilità di utilizzo di risorse altrimenti non utilizzabili. Tuttavia, i costi di investimento iniziali risultano maggiori di quelli relativi ai tradizionali impianti di microirrigazione e pertanto, diventano economicamente vantaggiosi, se l'efficienza del sistema viene garantita per periodi di almeno 15-20 anni.

La SDI, inoltre, permette di ottenere valori elevati di efficienza d'uso dell'acqua, spesso superiori al 90%, se associata ad un monitoraggio continuo dello stato idrico del suolo e della pianta e ad una corretta stima delle esigenze della coltura. L'utilizzo congiunto di impianti efficienti e gestione irrigua deficitaria, DI, durante specifiche fasi del ciclo fenologico delle colture può dunque permettere di ridurre ulteriormente i volumi irrigui senza comprometterne il risultato produttivo.

Risulta pertanto necessario individuare sistemi capaci di proteggere gli impianti ed allungarne la vita utile, circostanza questa che si traduce in una protezione degli erogatori da possibili fenomeni di intrusione radicale, oltre che sviluppare dei sistemi di monitoraggio capaci di rilevare in tempo reale e da remoto le variabili del sistema Suolo-Pianta-Atmosfera (SPA), in modo da supportare l'agricoltore nella programmazione dell'irrigazione, anche sulla base di strategie di gestione in condizioni di deficit idrico.

Obiettivo generale del presente studio, come previsto nel progetto di dottorato di ricerca industriale concordato con la società Irritec s.p.a. e con il Dipartimento di Ingegneria rurale ed Agroalimentare dell'Università Politecnica di Valencia, è stato quello di analizzare le principali problematiche ed i possibili sviluppi futuri della subirrigazione.

L'attenzione, nello specifico, è stata focalizzata sulla problematica dell'intrusione radicale e dell'invecchiamento di gocciolatori auto-compensanti installati all'interno di linee gocciolanti interrate a servizio di piante di agrume installate in vaso, oltre che sul risparmio idrico conseguibile in pieno campo attraverso gli impianti di subirrigazione, in assenza ed in presenza di condizioni di deficit idrico, rispetto ai sistemi irrigui a spruzzo tradizionalmente impiegati per la coltura dell'agrume.

Con riferimento al primo aspetto, è stata valutata l'efficacia di cinque principi attivi anti-intrusione radicale, Rame (Cu), Cianammide a due diverse concentrazioni CY1 (1,25%), CY2 (2,5%), e due diversi erbicidi, il Trifluralin (R1) ed il Preventol® (R2), contenuti all'interno di gocciolatori auto-compensanti installati lungo linee gocciolanti integrali prodotte da Irritec s.p.a., al fine di identificarne i possibili effetti sulla crescita dell'apparato radicale ed aereo di un comune portinnesto di agrume (*citrange* "Carrizo"). Per valutare gli effetti sullo sviluppo radicale, le piante sono state trapiantate all'interno di contenitori suddivisi da un setto che ha permesso la crescita indipendente delle radici nelle due metà del volume radicale irrigate rispettivamente da un gocciolatore contenente un principio attivo e da un gocciolatore di controllo. L'utilizzo di un minirizotrone costruito allo scopo, ha permesso di monitorare la crescita dell'apparato radicale nell'intorno del gocciolatore. Al fine di identificare gli effetti dei diversi principi attivi sullo sviluppo della pianta, alla fine dell'esperimento, è stato effettuato un rilievo distruttivo che ha permesso di valutare il peso delle singole componenti della pianta (radici, fusto, rami e foglie). Al termine dell'esperimento i gocciolatori sono stati sottoposti a prova in modo da valutare la relazione portata-pressione e rilevare le eventuali radici presenti all'interno di ciascun erogatore.

Per quanto concerne il secondo aspetto, invece, su un agrumeto commerciale di circa 30 anni è stata effettuata la riconversione di un impianto irriguo tradizionale a spruzzo con un più moderno impianto in subirrigazione, nel quale è stato effettuato il monitoraggio in tempo reale del sistema Suolo-Pianta-Atmosfera (SPA) per la determinazione dei parametri di programmazione dell'irrigazione, oltre che per valutare gli effetti dell'applicazione di condizioni di deficit idrico controllato (Deficit irrigation, DI) sullo stato idrico della pianta, sui flussi traspirativi e sullo sviluppo vegetativo estivo. L'esperimento ha permesso altresì di determinare i valori del coefficiente colturale basale K_{cb} e del coefficiente di stress K_s caratterizzanti le condizioni pedo-climatiche esaminate.

Per valutare l'efficacia, a scala aziendale, di tre dei principi attivi esaminati con le prove in vaso, sono stati realizzati a scala di campo, quattro distinti trattamenti, nei quali sono state installate ali gocciolanti contenenti Rame (Cu) e due diversi erbicidi, il Trifluralin (R1) ed il Preventol® (R2), oltre ad un trattamento di controllo nel quale sono state installate ali gocciolanti senza alcun principio attivo. Metà della superficie è stata gestita in condizioni di DI, mentre l'altra metà in condizioni di rifornimento irriguo ottimale (Full irrigation, FI). Il monitoraggio

della funzionalità degli erogatori nel tempo è stato effettuato sulla base di misure globali delle portate erogate da ciascun settore irriguo a parità di pressione di funzionamento dell'impianto.

Il sistema di sensori ("drill & dropTM") installati ha permesso, durante il primo anno di studio di monitorare l'irrigazione aziendale gestita secondo le consuetudini locali, oltre che le variabili climatiche. Nel secondo e terzo anno di attività, è stato attivato l'impianto di subirrigazione, implementato il sistema di monitoraggio dello stato idrico della pianta mediante l'installazione di sensori (*sap-flow* e psicrometri) ed effettuato il monitoraggio del potenziale fogliare mediante camera pressiométrica di Scholander. Inoltre, per valutare gli effetti del deficit idrico sulla vegetazione, sono stati eseguiti rilievi sulla morfologia della chioma, sul LAI, sulla potatura e sulla sviluppo della vegetazione durante il periodo estivo.

Nel corso del triennio di dottorato si è altresì proceduto, utilizzando il banco prova esistente presso il laboratorio di idraulica ed irrigazione dell'Università Politecnica di Valencia, alla caratterizzazione idraulica degli apparecchi erogatori installati in campo.

I vari principi attivi esaminati, destinati ad inibire l'intrusione radicale, non hanno evidenziato effetti negativi diretti sullo sviluppo vegetativo di piante in vaso del portinnesto utilizzato (*citrange* 'Carrizo'). L'intrusione radicale si è verificata in presenza di tutti i principi attivi con intensità e fenomenologia variabile; le relativamente migliori performance di protezione dai fenomeni di intrusione radicale sono state ottenute con gli erogatori contenenti Preventol® (R2).

Nonostante i fenomeni di intrusione radicale abbiano interessato, in misura diversa, tutti i modelli di erogatore esaminati, la caratterizzazione idraulica dei gocciolatori effettuata dopo due anni di utilizzo ha permesso di rilevarne la funzionalità residua, che comunque può essere ripristinata con le normali operazioni di pulizia degli impianti.

L'utilizzo delle moderne tecnologie dell'informazione e della comunicazione (ICT), integrate con sensoristica di monitoraggio dello stato idrico del suolo (sensori "drill & dropTM" Sentek), della pianta (*sap-flow* e psicrometri) e dell'atmosfera (stazione metereologica), ha permesso di creare un ambiente intelligente, capace di trasferire le informazioni in tempo reale attraverso specifiche applicazioni fruibili tramite cellulare o computer.

Il sistema di sensori installati in pieno campo ha permesso di monitorare durante i tre anni di indagine, le dinamiche dell'acqua nel suolo e nella pianta in relazione alla richiesta evapotraspirativa dell'atmosfera.

L'uso della subirrigazione, congiuntamente all'applicazione di strategie di irrigazione deficitaria ha permesso il contenimento dei volumi irrigui, con percentuali medie di risparmio idrico nel biennio 2018-2019 pari rispettivamente al 12,6% e 14,0% per le tesi in assenza di deficit idrico (FI) ed al 43,6 e 35,3 per le tesi mantenute in deficit idrico durante la fase II dello sviluppo vegetativo (DI) rispetto all'irrigazione tradizionale.

Le informazioni acquisite hanno permesso di definire delle soglie di intervento irriguo basate sulla risposta della coltura allo stress idrico. Nello specifico, indipendentemente dal sito di misura, è stato identificato un valore soglia del potenziale idrico predawn, ψ_{pd} , pari a -0,45 MPa, al di sotto del quale si manifestano riduzioni di traspirazione effettiva rispetto alla potenziale. In corrispondenza di tale valore, nelle ore più calde della giornata sono stati misurati valori di ψ_{stem} , compresi tra -1,2 e -1,4 MPa.

Lo studio delle dinamiche traspirative della coltura durante la stagione irrigua, con piante sottoposte a differenti strategie irrigue ha permesso, nei due anni di studio, sia di quantificare il coefficiente colturale basale (K_{cb}) relativo alla fase intermedia di sviluppo della pianta, che è risultato nei due anni pari a 0,40 (tesi FI), sia il coefficiente di stress (K_s) che, nelle condizioni esaminate, è risultato pari a 0,75 nel 2018 e 0,57 nel 2019 (tesi DI).

Lo studio condotto ha permesso quindi di identificare le relazioni tra le varie componenti del sistema SPA e quantificare i parametri utili per la gestione dell'irrigazione in modo automatizzato, oltre che di verificare l'utilizzabilità del metodo irriguo sub-superficiale su colture agrumicole al fine di ottimizzare l'uso della risorsa idrica.

1. Introduzione

La Food and Agriculture Organization, FAO (www.fao.org), stima che nel 2025 i due terzi della popolazione risiederà in aree caratterizzate da limitate risorse idriche nelle quali, inevitabilmente, si accrescerà la competizione per utilizzo delle stesse. Tra i vari settori produttivi dell'uomo, l'agricoltura assorbe la maggior parte di queste risorse e, considerata la necessità di adattamento ai cambiamenti climatici, salvaguardando la resilienza degli agrosistemi, sarà necessario ripensare allo sviluppo agricolo attraverso l'applicazione di strategie e metodi per il miglioramento della sostenibilità delle produzioni, soprattutto quelle in irriguo, per adeguarsi alle continue evoluzioni del sistema (Provenzano et al., 2014).

L'aumento dell'efficienza dell'uso della risorsa idrica in agricoltura, è uno degli obiettivi a cui tendere per raggiungere la sostenibilità delle produzioni. Un primo aspetto su cui la ricerca, sia scientifica che industriale, ha dato ampio sviluppo è stato il miglioramento dei materiali e delle tecnologie degli impianti di irrigazione al fine di renderli sempre più efficienti e vantaggiosi, anche economicamente. L'avanzamento delle conoscenze ha permesso di migliorare l'uniformità di distribuzione dell'acqua e nel contempo ridurre i volumi idrici somministrati e l'energia necessaria per gli adacquamenti, favorendo l'adozione di metodi irrigui sempre più efficienti, quale quello di irrigazione localizzata a bassa pressione. Nell'ambito di tale metodo irriguo, la subirrigazione (SDI) permette di somministrare l'acqua ed i nutrienti direttamente nel volume occupato dall'apparato radicale delle piante e pertanto limitare le perdite per evaporazione superficiale e percolazione profonda, pur garantendo elevati livelli di produttività (Rallo et al., 2011). La SDI, data la posizione interrata e l'assenza di contatto dell'acqua irrigua con la parte edibile della produzione, consente di utilizzare acque non convenzionali, altrimenti inutilizzabili in altri settori (Lamm, 2002). Questa tecnica, inoltre, permette di ottenere valori elevati di efficienza d'uso dell'acqua, spesso superiori al 90%, se associata ad un monitoraggio continuo del sistema e ad una corretta stima delle esigenze della coltura.

Al fine di ottimizzare l'efficienza d'uso dell'acqua occorre, da una parte, che il progetto degli impianti irrigui sia finalizzato ad ottenere elevati valori dell'uniformità di distribuzione in campo e, dall'altra, che durante la gestione si utilizzino strategie irrigue che prevedano

l'applicazione di volumi idrici strettamente necessari a sopperire ai consumi della pianta. Tra queste, l'applicazione di condizioni di deficit idrico (DI) durante specifiche fasi del ciclo fenologico delle colture può permettere di ridurre i volumi irrigui senza comprometterne il risultato produttivo e, talvolta, di migliorare qualitativamente la produzione (Kennedy et al., 2002; Castellanin et al., 2007).

L'applicazione di strategie che prevedano l'insorgenza di condizioni di deficit idrico per la pianta richiede la conoscenza specifica e approfondita del sistema suolo-pianta-atmosfera, in modo da evitare effetti negativi sullo sviluppo vegetativo della coltura e conseguenze sulle produzioni. La gestione del DI è effettivamente applicabile soltanto se supportata da un sistema di monitoraggio in campo che permetta di conoscere, in tempo reale, le variabili del sistema e lo stato idrico della coltura (Capra et al., 2008). A tal fine, l'utilizzo delle moderne tecnologie dell'informazione e della comunicazione (ICT), integrate con la sensoristica di monitoraggio, permette di creare un ambiente intelligente capace di trasferire le informazioni in tempo reale all'agricoltore o agli operatori di settore attraverso specifiche applicazioni fruibili tramite cellulare o computer; l'uso di tecnologie ICT consente quindi di implementare efficaci sistemi di supporto alle decisioni anche quando si utilizzano avanzate strategie di gestione irrigua quali, per l'appunto, quella che prevede l'applicazione di condizioni di deficit idrico per la pianta (Provenzano et al., 2018).

L'applicazione di tali strategie richiede, oltre al monitoraggio del sistema Suolo-Pianta-Atmosfera, la conoscenza delle fasi fenologiche nelle quali la coltura è meno sensibile allo stress idrico, in modo da programmare correttamente il periodo idoneo di applicazione.

Il concetto di irrigazione in condizioni di deficit idrico controllato (RDI) è stato introdotto per la prima volta da Chalmers et al. (1981), e Mitchell and Chalmers (1982) per controllare la crescita vegetativa nei frutteti, dopo aver riconosciuto che è possibile limitare gli apporti irrigui senza ridurre la rese produttive. Il RDI può essere utilizzato come strumento per ottimizzare l'equilibrio tra lo sviluppo vegetativo della chioma e quello delle radici, la crescita dei frutti e la induzione a fiore delle gemme. Tali obiettivi possono essere perseguiti attraverso un'opportuna modulazione dei tempi e dei livelli del periodo di deficit, per avvantaggiarsi della diversa sensibilità, nel corso della stagione, dei principali organi della pianta e dei

processi di crescita vegetativa e riproduttiva, e tenendo in considerazione la specificità della coltivazione (Capra et al., 2008).

Tuttavia, l'applicazione di tale strategia nel lungo periodo, può limitare le riserve della pianta e la crescita dell'apparato radicale portando ad una generale riduzione della capacità di fruttificazione, alla perdita di vigore e, conseguentemente, alla riduzione della capacità produttiva (Intrigliolo et al., 2013). Quindi, la scelta del periodo ottimale dell'applicazione del deficit idrico deve essere ponderata, in modo da massimizzarne i benefici. Nel mandarino e nella clementina, l'applicazione di condizione di DI durante la fase II della crescita del frutto, corrispondente con il periodo di crescita precoce del frutto, non comporta una riduzione significativa della produzione, pur permettendo una riduzione dei volumi irrigui (risparmio economico) e un incremento della qualità dei frutti (aumento del prezzo di vendita) (Ballester et al., 2014; Panigrahi et al., 2014). Negli agrumi, più in generale, la gestione in DI si sovrappone temporalmente al periodo di sviluppo vegetativo estivo, durante il quale le ridotte disponibilità idriche fornite possono rallentare la normale crescita della pianta, fino ad arrestarla del tutto in condizioni particolarmente severe. La possibile riduzione ripetuta negli anni dello sviluppo vegetativo estivo può tuttavia avere rilevanza nelle fasi di crescita, fioritura e fruttificazione degli anni successivi e pertanto risulta utile il monitoraggio degli effetti sul flusso di vegetazione estiva della gestione in DI, anche per valutarne gli eventuali effetti di lungo periodo.

1.1 Prospettive e limitazioni della subirrigazione

La subirrigazione (Subsurface Drip Irrigation, SDI) è stata definita dall'ASABE come l'applicazione di acqua al di sotto della superficie del suolo effettuata con apparecchi erogatori caratterizzati da portate distribuite nello stesso ordine di grandezza di quelle dei tradizionali gocciolatori (Rodriguez-Sinobas, 2012).

La profondità di installazione delle ali gocciolanti dipende dal tipo di coltura, dal tipo di suolo, dalla tipologia della risorsa idrica impiegata, dal clima, dagli strumenti di lavoro presenti in azienda. Molti autori hanno contribuito all'evoluzione della tecnica affrontando sia aspetti concettuali del metodo irriguo, che aspetti legati alla progettazione delle reti di distribuzione (Hanson et al., 1997; Van der Gulik, 1999; Burt and Styles, 2007; Lamm and Camp, 2007; Lamm, 2009; Li et al., 2019).

I molteplici vantaggi della SDI possono essere ricondotti, secondo Lamm (2012), principalmente all'opportunità di riduzione dei volumi irrigui, al possibile utilizzo di risorse idriche altrimenti non utilizzabili, quali ad esempio le acque reflue depurate, oltre che all'opportunità di stabilizzare la resa delle colture gestite in deficit idrico controllato. Mediante la SDI i volumi di adacquamento vengono apportati direttamente nella zona radicale, limitando così le perdite dovute ai fenomeni di evaporazione del suolo ed i processi di deflusso superficiale e, se gli impianti sono correttamente gestiti, limitando anche la percolazione profonda.

Per tali vantaggi, i sistemi SDI hanno ricevuto nel tempo grande attenzione da parte di ricercatori e agricoltori, con applicazioni su diverse colture (Ayars et al., 1999; Pisciotta et al., 2018; Martínez-Gimeno et al., 2018). Tuttavia, in relazione ai costi di investimento iniziali, più elevati rispetto ai tradizionali sistemi microirrigui, l'uso della SDI può diventare economicamente vantaggioso solo se l'efficienza dell'impianto è garantita per lunghi periodi, dell'ordine di 15-20 anni (Lamm et al., 2015; 2017).

Tra le limitazioni più rilevanti nell'uso della SDI sono da citare principalmente quelle associate ai fenomeni di occlusione dei gocciolatori ed alla difficoltà di manutenzione degli impianti irrigui interrati (Capra and Scicolone, 1998; Niu et al., 2012). L'occlusione anche parziale delle luci di passaggio del labirinto interno dei gocciolatori riduce notevolmente

l'uniformità della distribuzione dell'acqua in campo (Ravina et al., 1997; Capra and Scicolone, 1998), influenzando negativamente la crescita e la resa delle colture.

Infatti, se in condizione di elevata uniformità della distribuzione irrigua tutte le piante ricevono approssimativamente la stessa quantità di acqua e nutrienti, permettendo una crescita omogenea della coltura al netto di eventuali differenze spaziali del suolo, l'ostruzione di parte degli erogatori determina una distribuzione non uniforme del volume irriguo, con aree scarsamente irrigate nelle quali i volumi irrigui potrebbero risultare insufficienti o assenti, con limitazione della crescita delle piante o addirittura causarne la morte (Liu et al., 2009). Di contro, aumentando la durata degli adacquamenti, si possono generare aree eccessivamente irrigate nelle quali si verifica la percolazione al di sotto dell'apparato radicale, con lisciviazione dei fertilizzanti, rischio di contaminazione della falda, oltre che riduzione dell'efficienza della distribuzione irrigua.

Le ragioni dell'ostruzione dei gocciolatori possono essere classificate in: i) occlusione fisica generata da particelle trasportate dalla corrente idrica, ii) chimica dovuta essenzialmente alla precipitazione di sostanze presenti nelle acque e iii) biologica causata dalla crescita di batteri o radici all'interno dei percorsi idraulici del gocciolatore (Bucks et al., 1979).

I fenomeni di occlusione causati da processi fisici sono stati identificati tra quelli più comuni e sono dovuti in prevalenza a particelle di argilla e limo in sospensione nelle acque irrigue. Sono stati fatti molti studi finalizzati a comprendere tali fenomeni e come questi influenzino l'uniformità di distribuzione; i fenomeni di occlusione, tuttavia, si verificano in modo casuale e, in accordo con Bralts et al. (1981b), esistono almeno cinque possibili condizioni di occlusione dei gocciolatori installati in campo: (a) i fenomeni di occlusione interessano parzialmente, ma allo stesso modo, l'intero gocciolatore ovvero (b) una porzione specifica di questo; (c) i fenomeni di occlusione interessano l'intero percorso idraulico all'interno del gocciolatore e tutti i gocciolatori ovvero (d) soltanto un campione di essi ed ancora, (e) i fenomeni di occlusione si manifestano con ostruzione totale o parziale del gocciolatore. Quest'ultimo caso è quello che si verifica in prevalenza e tutti gli altri casi derivano da esso. In campo, osservare e misurare l'effetto dell'ostruzione, specialmente se parziale, risulta molto complesso e richiede un grande dispendio di risorse e di tempo; per questi motivi molti studi sono stati condotti in laboratorio e in condizioni controllate. Alcuni

di questi hanno permesso di valutare, ad esempio, la sensibilità all'occlusione di vari modelli di gocciolatori esistenti in commercio e studiarne i meccanismi che la determinano (Ravina et al., 1992; 1997; Wei et al., 2008; Niu et al., 2013; Bounoua et al., 2016; Li et al., 2019).

I gocciolatori sottoposti a prova in tali studi, sono prevalentemente gocciolatori non auto-compensanti: per tali modelli di erogatore è stata ricercata la dipendenza dei fenomeni di intasamento dalla geometria del labirinto interno. Diversamente, nei gocciolatori auto-compensanti, la presenza della membrana elastica può influenzare il processo di occlusione che può condurre, contrariamente a quanto ci si potrebbe aspettare, ad un incremento della portata (Liu et al., 2009; Pinto et al., 2017).

Al fine di prevenire l'invecchiamento del sistema causato soprattutto dalla perdita di funzionalità dei gocciolatori e dalla conseguente riduzione dell'uniformità di distribuzione irrigua, il costante monitoraggio del sistema deve essere abbinato ad un'adeguata e routinaria manutenzione. Monitorando la portata in testa al settore irriguo in corrispondenza di una prefissata pressione di funzionamento dell'impianto, è possibile rilevare l'eventuale ostruzione di parte dei gocciolatori; tale verifica, ancorché globale, può consentire di identificare il momento in cui devono essere eseguite le normali operazioni di manutenzione.

Nel caso di gocciolatori auto-compensanti, il problema risulta essere più complicato poiché l'intasamento dei gocciolatori può comportare sia un aumento, che una riduzione della portata media erogata, impedendo di stimare correttamente il livello di occlusione del sistema. (Camargo et al., 2014). Al fine di prevenire o attenuare i fenomeni di ostruzione fisica del gocciolatore, il filtraggio ed il flushing sono metodi semplici da applicare e molto efficaci (Nakayama e Bucks, 1991). Un adeguato sistema di filtraggio serve a prevenire l'intrusione fisica dei materiali sospesi nel sistema di irrigazione, mentre il flushing può eliminare dalle tubazioni eventuali solidi sospesi depositati in corrispondenza delle luci di ingresso dell'acqua all'interno dell'erogatore (Han et al., 2018). D'altra parte, anche un aumento alternato della pressione di funzionamento dell'impianto, laddove possibile, può contribuire a liberare il labirinto interno del gocciolatore da eventuali depositi solidi (Zhang et al., 2017).

L'occlusione chimica può essere controllata con l'iniezione di acido (riducendo il pH), in modo da riportare in soluzione eventuali precipitati, contribuendo così alla solubilizzazione ed all'allontanamento di eventuali concrezioni formatesi all'interno del gocciolatore. Nakayama

and Bucks (1986), hanno raccomandato di utilizzare una soluzione a pH = 2 per contrastare i fenomeni di occlusione chimica. Il trattamento mediante clorazione è il metodo più comune per prevenire l'occlusione biologica che si verifica principalmente con acque nelle quali sono presenti elevati quantitativi di sostanza organica (Ravina et al., 1992). Tali metodi possono essere utilizzati nel corso di interventi di manutenzione straordinaria, quando si verifica una elevata presenza di gocciolatori intasati; tuttavia, in taluni casi può risultare difficile o addirittura impossibile il ripristino delle funzionalità del sistema (Lamm and Camp, 2007).

Oltre alle problematiche descritte, che valgono in generale per tutti i sistemi a goccia, quando i gocciolatori sono installati al di sotto della superficie del suolo, l'intrusione radicale all'interno del gocciolatore può rappresentare la principale causa di occlusione. Infatti, negli impianti in subirrigazione, le radici sono principalmente concentrate nel terreno intorno agli erogatori, dove è presente il maggiore contenuto di acqua e nutrienti (Phene et al., 1991).

Al fine di prevenire l'intrusione radicale all'interno dei percorsi del flusso del gocciolatore, le aziende manifatturiere propongono modelli di erogatori in cui gli erbicidi o altri principi attivi anti-radice (Anti Root Agents, A-Rt-Ag) sono integrati negli stessi nel corso del processo produttivo. Un'altra pratica utilizzata per prevenire l'intrusione radicale è l'iniezione, attraverso il sistema di subirrigazione, di sostanze quali il "Tiazopir", acido solforico o fosforico, o erbicidi come il "Trifluralin" (Suarez-rey et al., 2006). Quest'ultimo è stato uno degli A-Rt-Ag più utilizzati in passato per la sua lunga emivita (alcuni mesi) e la bassissima migrazione all'interno del suolo, che consente al composto di rimanere nei pressi dell'area del gocciolatore, evitando lo sviluppo delle radici nei dintorni del gocciolatore. Nel 2007, la direttiva CEE 91/414 ha vietato l'utilizzo del Trifluralin per fini irrigui a causa della sua tossicità per gli organismi acquatici, compresi i pesci. A causa degli effetti negativi di tali prodotti sull'ambiente, nel tempo sono stati sviluppati e studiati altri principi attivi anti intrusione radicale, come alcuni estratti fitotossici naturali che tra l'altro possono essere ammessi in agricoltura biologica (Romanucci et al., 2018) o prodotti inerti, quali l'ossido di rame, che è un composto non solubile in acqua che agisce per contatto inibendo la crescita radicale (Schiffris et al., 2015). Tra questi, la cianamide è uno dei composti naturali allelopatici prodotti dalle radici di alcune piante come la veccia (*Vicia villosa* Roth.) e può essere

utilizzata come A-Rt-Ag, grazie al suo effetto inibitorio comprovato sulla crescita radicale (Soltys et al., 2012).

Tuttavia, l'uso dei diversi principi attivi anti intrusione radicale, dato il loro effetto inibente, potrebbe influenzare negativamente la crescita delle piante, in particolare dell'apparato radicale con conseguente riduzione della crescita dei germogli e con ripercussioni sulla produzioni. Le ricerche in pieno campo o in vaso sull'effettiva influenza dei vari principi attivi sul sistema vegetale sono limitate. L'interesse industriale ad individuare nuovi prodotti utili per la protezione dei gocciolatori dall'intrusione radicale e l'individuazione di nuovi prodotti con un ridotto impatto ambientale che possano essere utilizzati anche in agricoltura biologica è un tema di ricerca attuale ed ancora da esplorare e che ha spinto ad indagare sull'efficacia di diversi principi attivi finalizzati ad evitare l'intrusione radicale.

1.2 Monitoraggio e modellazione del sistema Suolo-Pianta-Atmosfera (SPA)

Il concetto di sistema continuo Suolo-Pianta-Atmosfera, SPA, fu teorizzato per la prima volta da Philip nel 1966. Lo schema semplificato proposto pone in connessione idraulica i tre elementi del sistema, che si influenzano vicendevolmente. Il movimento dell'acqua dal suolo, all'atmosfera è influenzato dalle caratteristiche idrauliche del suolo, dalle caratteristiche morfologiche e funzionali della pianta e dalla richiesta evapotraspirativa dell'atmosfera. Il flusso idrico all'interno del sistema SPA, in analogia con i flussi di corrente, segue i gradienti di potenziale, muovendo da zone a più alto potenziale idrico verso zone caratterizzate da potenziali minori. Normalmente, il flusso idrico muove dal suolo ($\psi_s = -0,03 \div -1,5$ MPa) verso l'atmosfera ($\psi_{atm} = -50 \div -120$ MPa), passando attraverso la pianta. Si tratta pertanto di un processo passivo esercitato attraverso la pianta da una pressione negativa o di suzione. La figura 1.2.1 mostra uno schema semplificato delle varie componenti del sistema in analogia con un circuito elettrico.

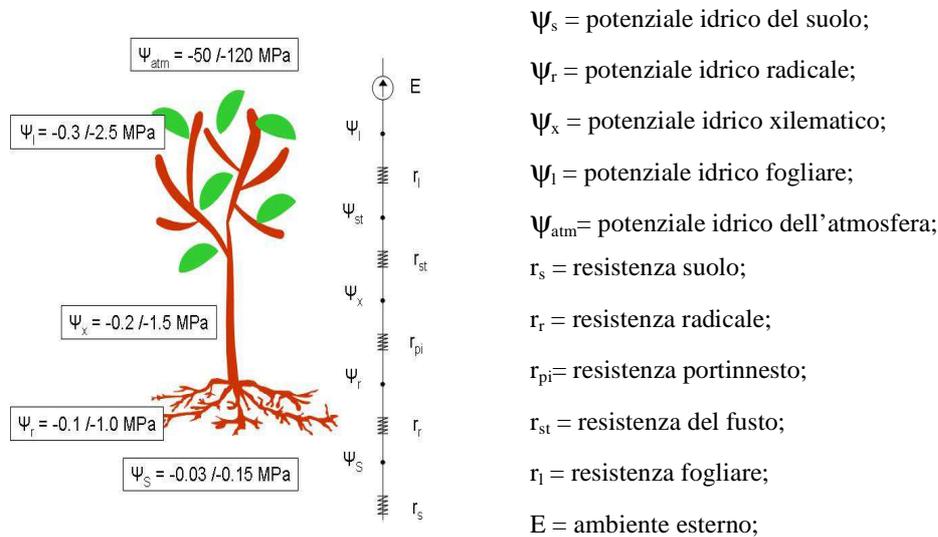


Figura 1.2.1. Schematizzazione del continuo Suolo-Pianta-Atmosfera (SPA) ed analogia con un circuito elettrico.

Il monitoraggio delle varie componenti del sistema può essere effettuato utilizzando diversi schemi concettuali e diverse attrezzature, con gradi di complessità crescenti a seconda del livello di dettaglio e precisione della misura dello stato idrico delle tre componenti del sistema. Inoltre, grazie allo sviluppo recente della sensoristica e delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione (ICT), risulta molto più semplice, rispetto al passato, integrare le diverse informazioni ottenute dai vari sensori installati, in un ambiente intelligente capace di analizzare e trasferire i dati in tempo reale, rendendole accessibili da remoto tramite applicazioni specifiche.

La determinazione del contenuto idrico del suolo può essere eseguita attraverso la misura di grandezze direttamente o indirettamente correlate con il quantitativo di acqua in esso presente. I metodi indiretti si basano sulla misura delle proprietà fisiche del mezzo poroso (es., capacità termica, contenuto di atomi di idrogeno, costante dielettrica), correlate con il contenuto di acqua presente nel terreno.

Il metodo gravimetrico, rappresenta uno dei metodi diretti per la misura del contenuto idrico più semplici ed utilizzati. Con tale metodo è possibile determinarne la percentuale in peso, U [g/g], riferita al peso secco del campione e, attraverso la conoscenza della massa volumica apparente del terreno è possibile determinarne la percentuale in volume, θ , come:

$$\theta = U \frac{\rho_b}{\rho_w} \quad [\text{g/g}] \quad (1.2.1)$$

nella quale ρ_b [g/cm³] e ρ_w [g/cm³] rappresentano rispettivamente la massa volumica apparente del terreno e dell'acqua.

Un altro metodo per la misura del contenuto idrico del suolo si basa sull'utilizzo di fonti radioattive che permettono la diffusione di neutroni all'interno del terreno (Neutron Scattering, NS). I neutroni emessi vengono rallentati o termalizzati dagli atomi di idrogeno presenti nel suolo, e poiché la maggior parte degli atomi di idrogeno nel suolo sono componenti delle molecole dell'acqua, il numero di neutroni che viene termalizzato è proporzionale al contenuto di acqua nel suolo (Zazueta and Xin, 1994). Questa tecnica fu utilizzata per la prima volta per misurare il contenuto di acqua nel suolo negli anni cinquanta del secolo scorso (Gardner and

Kirkham, 1952). Nel tempo le strumentazioni basate sul NS sono migliorate in termini di portabilità, programmabilità, peso e dimensioni con l'uso di sorgenti radioattive più piccole e quindi più sicure, con errori soddisfacenti per molte applicazioni (Gardner, 1986). Tuttavia, anche se la misura con la sonda a neutroni, sottoposta a calibrazione sito-specifica, rappresenta il metodo indiretto più accurato e preciso per la misura del contenuto idrico del suolo in campo (Evetts and Steiner, 1995; Evetts et al., 2009), le norme di sicurezza legate all'utilizzo delle fonti radioattive, che richiedono licenze e formazione specifiche per gli utenti e le pratiche burocratiche necessarie fanno sì che tale tecnica di misura rimanga confinata alle sole attività di ricerca.

Un altro gruppo di sensori per la stima indiretta del contenuto idrico del suolo si basa sulle misure della permittività dielettrica relativa (ϵ_r) del suolo. Tra questi, i sensori che utilizzando la Riflettometria nel Dominio del Tempo (Time Domain Reflectometry, TDR) e la Riflettometria nel dominio delle frequenze (Frequency Domain Reflectometry, FDR) sono tra i più utilizzati, poiché permettono di misurare in continuo il contenuto idrico del suolo, senza alterarne le proprietà fisiche (Robinson et al., 2008). La tecnica TDR prevede che un generatore di impulsi invii un segnale elettromagnetico ad una sonda interrata costituita, nella configurazione più usuale, da due o più conduttori metallici paralleli, come mostrato in figura 1.2.2 (Ferré and Topp, 2002).

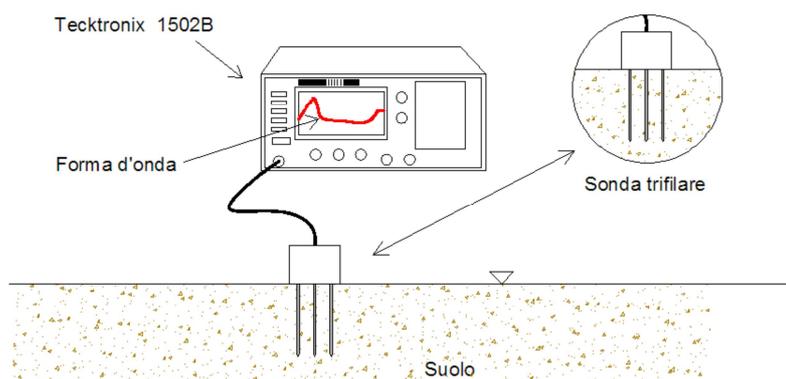


Figura 1.2.2. Sistema TDR per la misura dei contenuti idrici del suolo.

Le sonde FDR, invece, sfruttano le proprietà intrinseche del suolo, che è considerato come parte di un condensatore in cui i dipoli nel mezzo dielettrico si allineano sotto l'azione di un campo elettrico, diventando polarizzati.

Entrambe le tecniche permettono la misura della costante dielettrica apparente del suolo, ϵ_b , che permette di determinarne indirettamente il suo contenuto idrico. Il suolo può essere considerato un sistema trifasico in cui coesistono una fase solida (particelle di suolo), una liquida ed una aeriforme, le cui proprietà dielettriche dipendono dalla natura e dalla combinazione delle singole fasi costituenti. L'acqua, essendo un dipolo, presenta valori della costante dielettrica notevolmente maggiori ($\epsilon \approx 80$ a 20°C) rispetto all'aria ($\epsilon = 1$) ed alla fase solida del suolo ($\epsilon = 3-7$).

I sensori FDR hanno avuto negli ultimi anni una evoluzione tecnica che ne ha incrementato le possibilità applicative, ad esempio aumentando il numero di punti di misura lungo un profilo di suolo, come ad esempio il sensore "Enviroscan" (Sentek Sensors Technologies, Australia) o le più innovative sonde "drill & drop"TM (figura 1.2.3), molto semplici da installare.

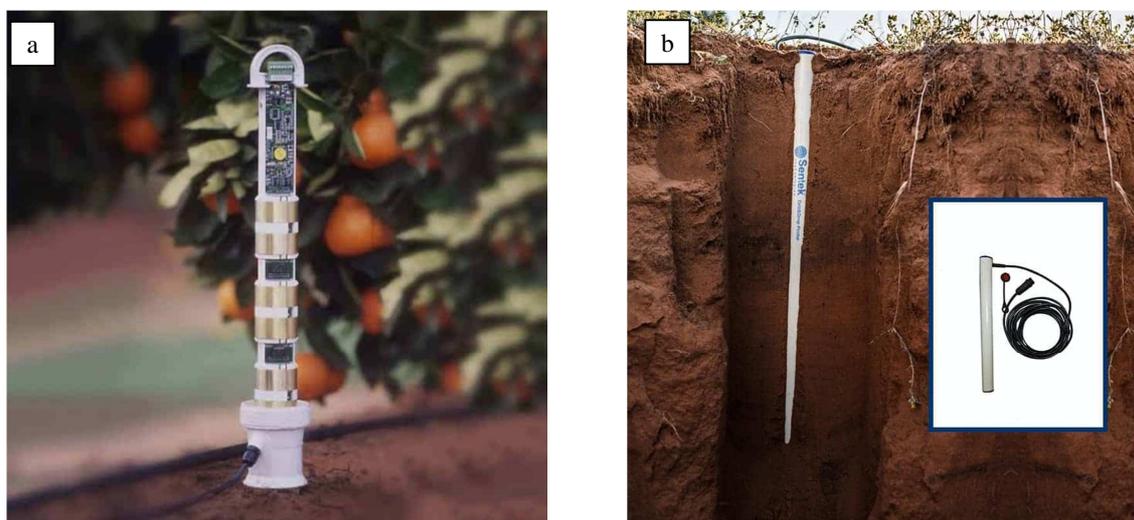


Figura 1.2.3. Sonda Enviroscan (a); sonda "drill & drop"TM(b).

La casa costruttrice degli strumenti fornisce un'equazione di calibrazione, sulla base della quale è possibile ricavare il valore di contenuto idrico del suolo, θ , a partire dai valori di

frequenza di oscillazione scalata misurata dal sensore (SF), utilizzando le misure in aria ed acqua:

$$\theta = \frac{(SF-c)^{\frac{1}{b}}}{a} \quad (1.2.2)$$

nella quale $a=0,2746$, $b=0,3314$ e $c=0$ sono i coefficienti di calibrazione proposti dal costruttore. Tale equazione è stata messa a punto sulla base di misure rilevate in Australia su diversi campioni di suolo a tessitura sabbiosa e franco sabbiosa, oltre che su substrati organici ed è caratterizzata da un valore di $R^2=0.9985$. Per eventuali esigenze di calibrazione dei sensori in suoli di differente tessitura, soprattutto in terreni argillosi, la casa costruttrice suggerisce la procedura descritta da Paltineanu and Starr (1997), che fa riferimento al contenuto idrico ottenuto con il metodo termo-gravimetrico, ottenuto utilizzando campioni rimaneggiati di suolo prelevati in prossimità dei pozzetti di misura. Il alternativa, è possibile utilizzare una procedura di laboratorio, che utilizza monoliti di suolo indisturbato (Provenzano et al., 2015) per i quali, il processo di essiccamento all'aria del campione, viene monitorato con contestuali misure di frequenza scalata rilevata dal sensore e di contenuto idrico del terreno misurato utilizzando il metodo termo-gravimetrico.

La zona di influenza del sensore è costituita da un anello cilindrico e si distingue nelle due componenti: assiale e radiale. La prima si estende verticalmente per circa 10 cm dal baricentro dei due anelli di misura, mentre la seconda, perpendicolare all'asse del tubo di accesso, si estende per circa 5-10 cm dalla parete esterna del tubo. L'accurata installazione risulta cruciale per garantire l'attendibilità delle misure. L'operazione richiede pertanto molta attenzione, al fine di evitare la presenza di eventuali sacche d'aria nell'intorno dei sensori di misura. Infatti, la presenza d'aria, può alterare il valore della costante dielettrica apparente del terreno, considerato che la costante dielettrica dell'aria risulta circa due ordini di grandezza inferiore a quella dell'acqua. Altri problemi che possono insorgere a causa di una scorretta installazione sono da attribuire all'eventuale modifica della struttura e della densità apparente del terreno, con inevitabili conseguenze sui processi di moto dell'acqua o l'eccessiva presenza di scheletro. Tuttavia, disporre di misure di contenuto di umidità assolute che tengano in

considerazione gli effetti delle problematiche sopra esposte, si ritiene non necessario al fine dell'effettivo utilizzo del sensore per la programmazione irrigua. Per tenere conto dell'eventuale variabilità all'interno di uno stesso suolo è opportuno normalizzare i dati rilevati rispetto al massimo e al minimo registrati dal sensore ovvero individuare soglie di intervento irriguo sito-specifiche in funzione di parametri che traducano la relazione tra l'umidità del suolo rilevata dal sensore e lo stato idrico della pianta.

I sensori FDR sono caratterizzati da una modesta richiesta energetica e pertanto si prestano all'installazione in campo permettendo una elevata frequenza di acquisizione dei dati. Inoltre, l'utilizzo congiunto dei sensori di misura con i moderni sistemi ICT, permette la raccolta e la gestione dei dati di contenuto idrico del suolo, garantendo anche la possibilità di processamento da remoto, attraverso specifiche applicazioni installate su cellulare o su pc, riducendo i costi di acquisizione e semplificando l'utilizzo delle informazioni ottenute.

Il monitoraggio dello stato idrico della pianta, può essere effettuato tramite la misura del potenziale dell'acqua presente negli organi della della pianta. Le misure di questo tipo permettono di meglio esplicitare i complessi processi di scambio idrico che avvengono all'interno della pianta e tra essa e l'ambiente esterno, seguendo lo schema indicato in precedenza (Figura 1.2.1). Tra gli strumenti di misura del potenziale idrico, uno tra i più utilizzati è la camera pressiométrica di Scholander (Scholander et al., 1965), che consiste in un contenitore di metallo con pareti spesse in connessione con un manometro per effettuare la misura, e una bombola erogatrice di gas inerte (generalmente azoto). La porzione di tessuto vegetale (foglia o germoglio), inserita all'interno della camera viene isolata dall'esterno mediante un tappo in gomma, dal quale sporge verso l'esterno la porzione del picciolo o del germoglio dove è stato effettuato il taglio che viene osservata mediante una lente di ingrandimento o un microscopio.

L'aumento della pressione all'interno della camera si trasmette alle cellule dell'organo vegetale che vengono compresse, aumentato artificialmente il loro potenziale di turgore, generando una fuoriuscita della linfa dalla superficie di taglio dei vasi xilematici recisi. La pressione alla quale tale circostanza si verifica viene definita pressione di equilibrio, perché controbilancia esattamente la pressione con cui l'acqua è trattenuta all'interno delle strutture

limitrofe ai fasci. In questa condizione il valore della pressione letto al manometro, eguaglia in modulo il potenziale matriciale xilematico, permettendone la misura diretta.

Un altro metodo, per il monitoraggio dello stato idrico della pianta, consiste nella misura diretta del potenziale xilematico, mediante l'utilizzo di psicrometri. Questa tecnica si basa sulla possibilità di utilizzo di una termocoppia come igrometro di precisione, sfruttando l'effetto Peltier (Spanner, 1951). L'utilizzo di tale tecnica in campo permette la misura non distruttiva del potenziale xilematico in modo continuo, attraverso il posizionamento del sensore in una porzione opportunamente esposta dello xilema (Dixon and Tyree, 1984). La figura 1.2.4a,b mostra lo schema di funzionamento e il relativo sensore. Lo strumento presenta una base di ottone cromato che garantisce una buona stabilità termica, all'interno della quale sono inserite due termocoppie (cromo/costantana) posizionate in serie, la prima collocata all'interno della camera (termocoppia C) e la seconda a stretto contatto con lo xilema (termocoppia S).

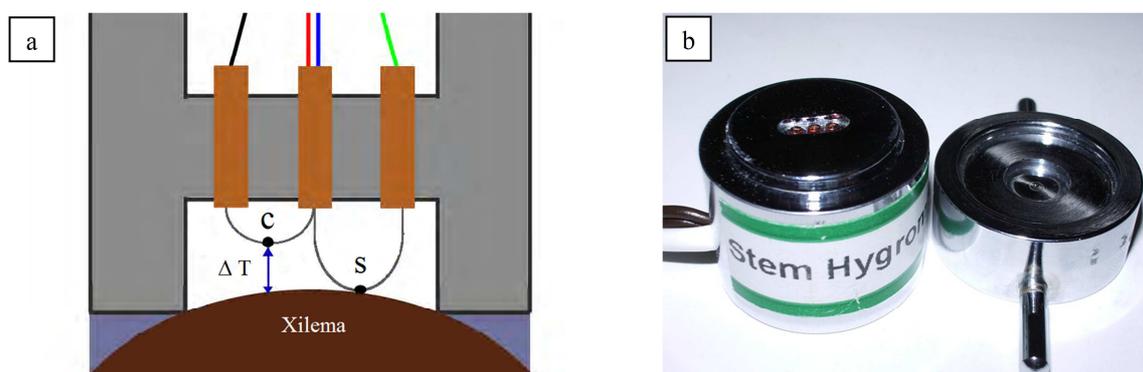


Figura 1.2.4. Schema di funzionamento dello psicrometro (a) e relativo sensore (b).

La misura differenziale tra queste due termocoppie (ΔT) rileva il gradiente di temperatura tra la camera ed il campione e permette la correzione della misura del potenziale xilematico dall'influenza di tale gradiente. La depressione psicrometrica del bulbo umido è misurata quando, a seguito del raffreddamento legato all'effetto Peltier si condensa sulla termocoppia una goccia di acqua dall'atmosfera della camera la quale successivamente evapora raffreddandone la giunzione. Questa misura è successivamente convertita in

potenziale xilematico attraverso una relazione di calibrazione ottenuta utilizzando soluzioni a potenziale noto.

Le misure sono condotte solitamente sulle foglie, ma lo strumento si presta anche per la misura sulle altre porzioni della pianta come radici, tronco, branche o frutti (Jobling et al., 1997). Inoltre, la misura mediante psicrometro è l'unico metodo non distruttivo per la determinazione del potenziale idrico nel materiale vegetale (Pérez et al., 2011). Tali considerazioni, associate alla possibilità di monitoraggio continuo e da remoto, fanno sì che lo strumento possa essere proficuamente utilizzato per la programmazione dell'irrigazione in funzione dello stato idrico della pianta (Stochnoff et al., 2018).

Un'altra via per il monitoraggio dello stato idrico della pianta è la misura della densità del flusso linfatico che percorre lo xilema che può essere misurato tramite sonde a dissipazione termica. Il metodo, si basa sulle relazioni tra la dissipazione termica per conduzione e convezione, causata dal flusso linfatico, del calore generato da un riscaldatore termoelettrico. Queste tecniche ampiamente utilizzate in specie legnose, godono oggi di grande interesse da parte della comunità scientifica, grazie alla disponibilità di affidabili e riproducibili sensori, che possono essere installati in situ ed automatizzati, in modo da ottenere misure in continuo dello stato idrico della pianta (Swanson 1994; Smith and Allen 1996; Burgess et al., 2001; Cermak et al., 2004; Lu et al., 2004).

Lo schema di misura classico proposto da Granier (1985) comprende due sensori aghiformi che vengono inseriti radialmente nel tronco o nelle branche. Ogni sensore contiene una termocoppia che permette la misura differenziale della temperatura tra i due aghi, posizionati normalmente almeno a 5 cm di distanza tra di loro. Il metodo si basa sulla dissipazione termica (CTD) del calore prodotto da un riscaldatore costituito da una resistenza elettrica avvolta intorno alla termocoppia della lunghezza di 2 cm che eroga una potenza di 0,2 W. La differenza di temperatura, misurata tra le due termocoppie, diminuisce con l'aumento della densità di flusso linfatico, responsabile della maggiore dissipazione di calore. La densità di flusso viene quindi stimata attraverso un indice termico, che è il rapporto tra la differenza di temperatura misurata quando il flusso è nullo, ovvero durante le ore notturne, rispetto a quella attuale misurata dal sensore; per convertire tale indice in densità di flusso è generalmente

adottata l'equazione di calibrazione proposta da Granier (1985), valida indipendentemente dalla coltura (Lu et al., 2004).

Applicando il metodo CTD e le sonde proposte da Granier molti autori hanno osservato valori prossimi o identici alla calibrazione originale proposta, su diverse specie arboree quali *Malus domestica* (Cabibel and Do, 1991), *Vitis vinifera* L. (Braun and Schmid, 1999), *Eucalyptus deglupta* Blume, (Clearwater et al., 1999), dimostrando una buona affidabilità del metodo per la stima della densità di flusso. Ciò nonostante l'applicazione del metodo presenta diversi problemi di utilizzo quali gli elevati consumi energetici richiesti per mantenere l'elemento riscaldante sempre acceso (Lu et al., 2004), l'influenza sulla misura del gradiente termico naturale (Do e Rocheteau 2002a; 2002b), oltre che la possibile risposta protettiva da parte della pianta in reazione al continuo stress da riscaldamento con conseguente isolamento del sensore dal tessuto conduttivo (Marañón-Jiménez et al., 2017).

Il Transient Thermal Dissipation method, TTP, proposto da Do and Rocheteau (2002a; 2002b), sullo stesso schema concettuale utilizzato da Granier, si basa invece su cicli alternati di riscaldamento e raffreddamento di almeno 10 minuti; la formulazione proposta considera le differenze di temperatura registrate durante i vari cicli di riscaldamento e raffreddamento, permettendo di tenere in conto anche l'influenza dei gradienti termici naturali sulle misure. Questo approccio permette notevoli risparmi energetici per effetto del minore tempo previsto in condizione di riscaldatore acceso. Il metodo è stato applicato da Isarangkool Na Ayutthaya et al. (2010) per misurare i flussi su diverse specie, sia in campo che in porzioni di branche in laboratorio ottenendo una calibrazione generale del sensore non legata alle specie considerate. Il protocollo TTP è implementabile anche utilizzando una sola sonda (Do et al. 2011), che garantisce oltre ad una maggiore praticità di installazione, minori costi del sistema. Per affrontare la problematica del gradiente termico naturale, che si verifica con maggiore frequenza nelle coltivazioni agrarie rispetto a quelle che caratterizzano le foreste, Lubczynski et al. (2012), hanno proposto un metodo di calcolo basato sulle equazioni originali di Granier, per eliminare la dipendenza delle misure dai gradienti termici naturali che si verificano in campo. Più recentemente, Do et al. (2018) e Nhean et al. (2019) hanno proposto degli avanzamenti sul metodo TTP applicato con cicli più brevi; le misure effettuate dagli autori

hanno permesso di identificare una differente procedura di calcolo del coefficiente termico e proporre una nuova relazione di calibrazione del sensore.

Per quanto riguarda la componente evapotraspirativa del sistema SPA, è possibile utilizzare strumenti che ne permettono la misura diretta, o modelli che ne permettano la stima utilizzando le misure ottenute da altre variabili atmosferiche correlate con la richiesta evapotraspirativa ed ottenibili attraverso l'utilizzo di comuni stazioni climatiche.

Uno degli strumenti largamente utilizzati per la misura diretta dell'evapotraspirazione è il lisimetro a pesata. Esso è realizzato isolando un volume di suolo rappresentativo del sistema colturale investigato e, tramite la presenza di bilance a bascula permette di monitorare le variazioni di peso della massa terrosa dovute agli apporti idrici e alle perdite per evapotraspirazione, percolazione profonda e ruscellamento. Questi strumenti sono considerati i più affidabili per la misura dell'evapotraspirazione colturale (ET) grazie alla possibilità di misurazioni dirette e semplici senza danni alle piante (Aboukhaled et al., 1982). L'evapotraspirazione viene stimata direttamente attraverso le variazioni di peso corrispondente a prefissati intervalli temporali, senza la necessità di calibrazione (Beeson, 2011). Inoltre, questi sistemi permettono la determinazione della sola componente traspirativa nei casi nei quali l'uso di teli plastici consente di limitare l'evaporazione dalla superficie del suolo (Burgess et al., 2000). I lisimetri sono tuttavia costosi da installare e mantenere e pertanto non hanno avuto un'ampia diffusione come strumento comune per la programmazione dell'irrigazione a scala aziendale; tuttavia sono considerati tra gli strumenti più affidabili per la misura dell'evapotraspirazione.

Differentemente, i modelli per la stima dell'evapotraspirazione richiedono generalmente come input dati ottenuti tramite stazioni meteorologiche, quali la radiazione solare, la temperatura, l'umidità relativa dell'aria e la velocità del vento.

Uno dei modelli largamente utilizzati fa riferimento all'approccio termodinamico proposto da Monteith (1965) e successivamente modificato nei quaderni FAO-23 (Doorenbos e Pruitt, 1977) e 56 (Allen et al., 1998).

La formulazione del modello FAO-56, schematizza il suolo come un serbatoio, la cui capacità di accumulo dipende dalle caratteristiche idrauliche del terreno e dalla massima profondità radicale che la coltura può raggiungere, e simula la variazione nel tempo del

contenuto idrico attraverso una funzione ad esaurimento. Quindi, la variazione dell'acqua disponibile, espressa in termini di deplezione nel giorno i -esimo, $D_{r,i}$ [mm] viene descritta dalla seguente relazione:

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - P_i + RO_i - I_i - CR_i + ET_{e,i} + DP_i \quad (1.2.3)$$

nella quale si è indicato con $D_{r,i}$ e $D_{r,i-1}$ [mm] l'entità della deplezione riferita al giorno i -esimo ed al precedente, con P_i [mm] l'altezza di precipitazione, con RO_i [mm] il deflusso superficiale, con $I_{e,i}$ [mm] l'irrigazione efficace, cioè la quantità di acqua che a seguito di un intervento irriguo si infiltra nel suolo, con CR_i [mm] l'apporto idrico per risalita capillare da falda sotterranea, con $ET_{e,i}$ [mm] l'evapotraspirazione effettiva della coltura e infine con DP_i [mm] la perdita di acqua per percolazione.

Il valore della deplezione può variare in un intervallo compreso tra zero, quando il contenuto idrico del suolo corrisponde alla capacità di campo, ed un valore massimo corrispondente all'acqua totale disponibile per la coltura, TAW, calcolata come:

$$TAW = 1000 (\theta_{cc} - \theta_{pa}) z_r \quad (1.2.4)$$

avendo indicato con θ_{cc} [cm³/cm³] il contenuto idrico alla capacità di campo, con θ_{pa} [cm³/cm³] il contenuto idrico corrispondente al punto di appassimento e con z_r [m] la profondità delle radici.

Nel modello FAO-56, la stima dell'evapotraspirazione della coltura di riferimento, $ET_{o,d}$ [mm/d], è riferita ad una coltura "standard", che corrisponde ad un prato stabile in assenza di limitazioni idriche e caratterizzato da un'altezza di 0,12 m, una resistenza superficiale, r_c , pari a 70 s/m e un valore di albedo, α , costante e pari a 0,23.

Introducendo tali valori nell'equazione di Penman-Monteith, Allen et al. (1998) hanno proposto la seguente equazione per il calcolo di $ET_{o,d}$ [mm/d]:

$$ET_{o,d} = \frac{0.408 \Delta (R_n - G_0) + \frac{900}{T_a + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (1.2.5)$$

nella quale Δ [kPa/°C] è la pendenza della curva della pressione di vapore saturo, R_n [MJ/m²/giorno] rappresenta il flusso della radiazione netta, G_0 [MJ/m²/giorno] il flusso di calore dal suolo, $e_s - e_a$ [kPa] il deficit di pressione di vapore dell'aria, γ [kPa/°C] la costante psicrometrica dell'aria, T_a [°C] la temperatura media dell'aria, u_2 [m/s] è la velocità del vento, queste ultime rilevate ad un'altezza di due metri dal suolo.

La stima dell'evapotraspirazione di riferimento consente di calcolare l'evapotraspirazione massima per una generica coltura, ET_c , in condizione di disponibilità idrica ottimale, mediante l'utilizzo di coefficienti colturali K_c , :

$$ET_c = K_c ETo \quad (1.2.6)$$

Questo approccio, definito *single crop coefficient approach*, considera congiuntamente nel coefficiente, K_c , le componenti della traspirazione della coltivazione e dell'evaporazione del suolo. Esso esprime un effetto medio nel tempo (generalmente più giorni) dell'evapotraspirazione a seguito delle possibili variazioni giornaliere dell'evaporazione a seguito di eventi di pioggia o irrigazione superficiale. Il concetto di coefficiente colturale, K_c , introdotto da Jensen nel 1968, è stato successivamente sviluppato da altri ricercatori (Doorenbos and Pruitt, 1975, 1977; Burman et al., 1980a; Burman et al., 1980b; Allen et al., 1998; Allen and Pereira, 2009).

Una rassegna completa dei valori assunti dai coefficienti colturali di diverse colture, per ciascuna fase del ciclo fenologico, è quella proposta da Allen et al. (1998) nel quaderno FAO56, nel quale i valori del suddetto coefficiente sono stati tabellati per numerose colture di interesse agrario.

Un ulteriore approccio, definito *dual crop coefficient approach*, si basa sulla determinazione separata degli effetti della traspirazione delle colture e dell'evaporazione del suolo. Vengono utilizzati due coefficienti: il coefficiente colturale basale (K_{cb}) utilizzato per valutare la traspirazione delle piante e il coefficiente di evaporazione dell'acqua dal suolo (K_e). Quindi, il singolo coefficiente K_c è sostituito da:

$$K_c = K_{cb} + K_e \quad (1.2.7)$$

Il coefficiente colturale basale, K_{cb} , è definito come il rapporto tra ET_c ed ET_o quando si verifica che lo strato superficiale del suolo è asciutto e, al contempo, il contenuto medio di acqua del suolo nella zona radicale permette la traspirazione della pianta senza limitazioni. Il K_{cb} rappresenta il K_c in assenza degli effetti aggiuntivi dell'evaporazione dovuta alla bagnatura del suolo mediante irrigazione o precipitazione. Il coefficiente di evaporazione del suolo, K_e , descrive la componente di evaporazione dalla superficie del suolo ed è massimo successivamente ad un evento di pioggia o irrigazione che umetti la superficie del suolo, risultando trascurabile nel caso della subirrigazione. Tuttavia, la somma di K_{cb} e K_e non può mai superare un valore massimo, $K_{c \text{ max}}$. Man mano che la superficie del suolo perde il contenuto di umidità, K_e diventa sempre più contenuto e tende a zero quando non è più presente acqua disponibile per l'evaporazione.

Per esprimere la dipendenza della traspirazione dal contenuto idrico del suolo il modello FAO-56 utilizza un coefficiente di stress idrico, K_s , variabile tra 0 ed 1, in funzione del contenuto idrico del suolo. L'effetto sull'evapotraspirazione colturale dello stress generato dalla riduzione del contenuto idrico può essere rappresentato moltiplicando il coefficiente colturale basale per il coefficiente di stress, K_s :

$$ET_{c \text{ adj}} = (K_{cb} K_s + K_e) ET_o \quad (1.2.8)$$

Numericamente, il calcolo del coefficiente di stress, K_s , richiede la definizione del cosiddetto fattore di deplezione, p , ovvero la frazione dell'acqua disponibile totale (TAW) che la pianta può assorbire prima che riduca i consumi traspirativi come conseguenza dei fenomeni di stress idrico:

$$K_s = \frac{TAW - D_i}{(1-p)TAW} \quad (1.2.9)$$

nella quale D_i [mm] indica l'ammontare della deplezione al giorno i -esimo. Il parametro p , tabulato nel quaderno FAO-56, è specifico della coltura considerata e può essere ottenuto empiricamente, osservando il legame funzionale tra lo stato idrico della pianta ed il contenuto idrico del suolo.

2. Obiettivi della tesi

Obiettivo generale della ricerca è stato quello di verificare dell'applicabilità del metodo irriguo sub-superficiale su colture agrumicole, focalizzando in particolare l'attenzione sulle possibili soluzioni per la prevenzione dell'intrusione radicale da una parte e, dall'altra, di identificare strategie di gestione dell'irrigazione volte al risparmio idrico, attraverso l'implementazione di un sistema di monitoraggio delle principali variabili del sistema Suolo-Pianta-Atmosfera.

Gli obiettivi specifici del lavoro possono essere così sintetizzati:

- Valutazione, con prove in vaso, dell'efficacia e delle possibili influenze sulla crescita dell'apparato radicale e aereo di portinnesto di agrumi comunemente utilizzato (*citrange* 'Carrizo'), di cinque principi attivi anti intrusione radicale inglobati all'interno dell'erogatore durante il processo di estrusione delle linee gocciolanti; i principi attivi esaminati sono, nello specifico, il Rame (Cu), la Cianammide in due concentrazioni, CY1 (1,25%) e CY2 (2,5%), nonché due diversi erbicidi, il Trifluralin (R1) ed il Preventol® (R2), tutti inglobati all'interno dello stesso modello di gocciolatore.
- Determinazione delle caratteristiche fisiche ed idrauliche del suolo nell'area prossima a quella esplorata dai sensori di umidità.
- Caratterizzazione geometrica ed idraulica degli apparecchi erogatori installati in campo che, per ciascuna tipologia, ha previsto la determinazione della relazione portata-pressione e del coefficiente di variabilità tecnologico.
- Implementazione di un sistema di monitoraggio in tempo reale e da remoto del contenuto idrico del suolo e della richiesta evapotraspirativa dell'atmosfera, unitamente a sensori di misura dello stato idrico della pianta (potenziali idrici, *sap-flow*) per l'identificazione di parametri utili per la programmazione dell'irrigazione.
- Valutazione in campo degli effetti di differenti strategie di gestione irrigua sullo stato idrico della pianta e sullo sviluppo vegetativo estivo, attraverso misure saltuarie dei potenziali idrici all'alba (*predawn*) e nelle ore più calde della giornata (*midday*) effettuate utilizzando la camera pressiometrica di Scholander e in continuo mediante uso di psicrometri, oltre che di misure dei flussi traspirativi con sensori tipo Granier.

- Stima del coefficiente colturale basale, K_{cb} , relativo alla fase intermedia di sviluppo della pianta, come pure dei coefficienti di stress, K_s , conseguenti all'applicazione di condizioni di deficit idrico nel biennio esaminato (2018-2019).
- Implementazione di una rete di sensori, a basso costo, per il monitoraggio remoto dei flussi linfatici, con la possibilità di configurazione per l'utilizzo con diversi protocolli sperimentali.

3. Materiali e metodi

3.1. Layout sperimentale delle prove in vaso.

Il layout delle prove, mostrato in figura 3.1.1, ha previsto la realizzazione di un sito sperimentale all'interno degli spazi dell'Università di Palermo, nel quale è stato sottoposto a prova uno stesso modello di erogatore contenente cinque distinti principi attivi anti intrusione radicale: Rame (Cu), Cianammide a due diverse concentrazioni CY1 (1,25%), CY2 (2,5%), come pure due diversi erbicidi, il Trifluralin (R1) ed il Preventol® (R2). Per ogni singolo trattamento è stata predisposta una fila di otto piante irrigate in subirrigazione con gocciolatori auto-compensanti (modello "Multibar C", Irritec) con portata nominale di 2,1 l/h posti ad interdistanza di 50 cm. I diversi filari sono stati distanziati di 100 cm, in modo da evitare interferenze tra gli stessi e tralasciando le acquisizioni relative ai filari di bordo.

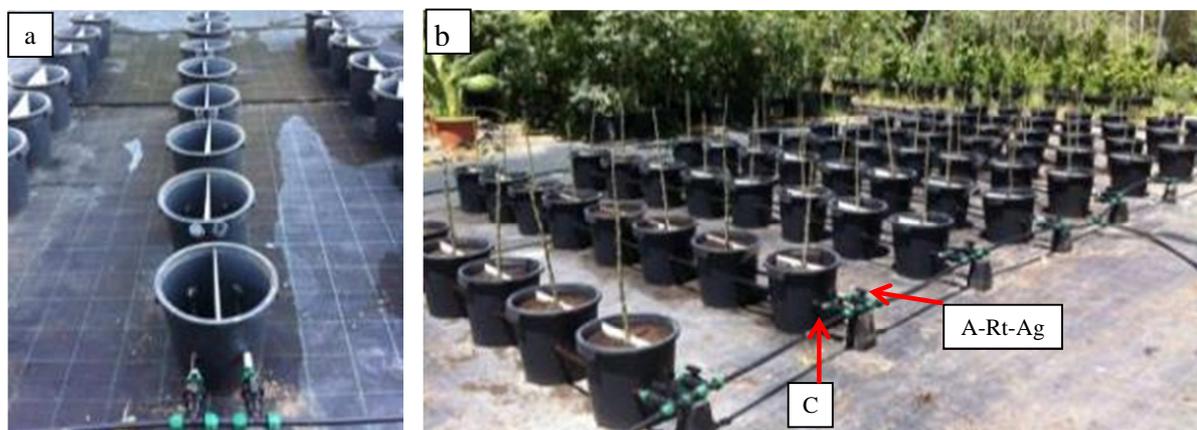


Figura 3.1.1. Installazione campo sperimentale: a) contenitori per la crescita indipendente delle radici b) posizione delle ali gocciolanti con principio attivo anti-radice (A-Rt-Ag) e senza (controllo con barriera fisica, C).

Per valutare i possibili effetti inibitori della crescita radicale delle diverse formulazioni oggetto della prova ciascuna pianta, rappresentata da portinnesto di *citrange* 'Carrizo', è stata

trapiantata in un contenitore del volume di 21 dm³, che è stato equamente suddiviso mediante un setto centrale in policarbonato (figura 3.1.1a), in modo da permettere la crescita indipendente delle radici nelle due porzioni del vaso. In metà del volume del vaso è stato installato, alla profondità di 18 cm, un gocciolatore autocompensante (modello “Multibar F”, Irritec), con portata nominale di 2,1 l/h, che includeva una barriera fisica, senza principio attivo e con funzione di controllo (C), mentre nell'altra metà è stato simmetricamente installato un gocciolatore contenente il principio attivo anti-radice (Anti-Root Agent, A-Rt-Ag) (figura 3.1.1b). Sono state inoltre previste due ulteriori tesi di controllo (C) in cui i gocciolatori installati su entrambe le metà vaso includevano la barriera fisica (PB), in modo da verificarne il comportamento in assenza di principi attivi anti-radice. La figura 3.1.2 mostra il layout sperimentale e lo schema dell'impianto irriguo, che ha previsto l'installazione di valvole di sfiato, di un manometro, un contatore volumetrico, del filtro a dischi e della centralina per la programmazione dell'irrigazione.

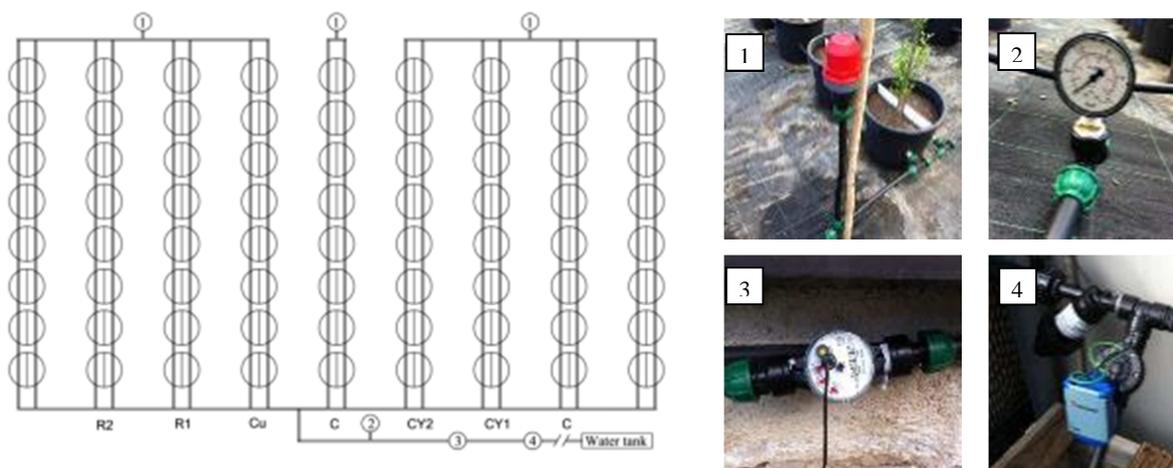


Figura 3.1.2. Layout sperimentale e sistema di irrigazione; 1) valvole di sfiato; 2) manometro; 3) contatore volumetrico; 4) Filtro a dischi e programmatore di irrigazione.

Le piante scelte per la sperimentazione, *citrango* ‘Carrizo’, sono portainnesti comunemente adoperati nell’agrumicoltura, ed utilizzati dall’azienda agrumicola sita in Villabate (Pa) nella quale è stata condotta la sperimentazione di pieno campo. Preliminarmente al trapianto, per preservare quanto più possibile l’apparato radicale, le piante

sono state poste in acqua per saturare ed ammorbidire il substrato all'interno della fitocella. Quest'ultimo è stato asportato attraverso un debole getto d'acqua, sufficiente ad allontanare il materiale estraneo dalle radici (figura 3.1.3a). Al fine di valutare possibili effetti dei vari principi attivi anti-radice anche sulla crescita della vegetazione, in fase di trapianto è stata eseguita una potatura drastica, in modo uniformare quanto più possibile le condizioni iniziali delle piante, eliminando quindi tutti i rami dal fusto e asportando parte del preesistente apparato radicale. Il fusto e il fittone sono stati tranciati rispettivamente a 50 cm ed a 13 cm dal colletto (figura 3.1.3b), in modo da garantire l'emissione di nuova vegetazione e nuove radici avventizie sulle quali sono state effettuate le successive misure relative allo sviluppo vegetativo. Le radici rimanenti sono state equamente suddivise nelle due metà del contenitore e coperte fino al colletto (figura 3.1.3c) con un substrato commerciale ("Vigorplant sq n° 4"), con una densità apparente di $0,6 \text{ g/cm}^3$ e composto da torba irlandese, sabbia di silice 0-3 mm e humus di corteccia.

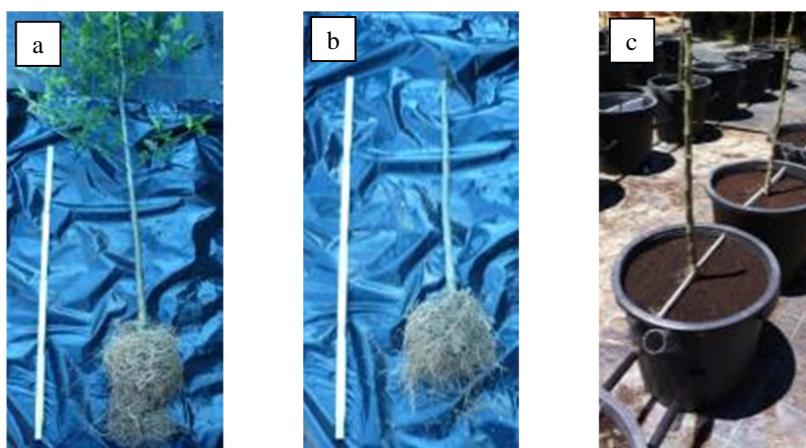


Figura 3.1.3. Fasi del trapianto: a) pianta dopo la pulitura dell'apparato radicale; b) potatura delle radici e della parte aerea; c) trapianto in vaso.

Al momento del trapianto è stata eseguita la misura delle principali caratteristiche morfologiche delle piante. Per ogni pianta è stato misurato il diametro del colletto e del tronco all'altezza della potatura ed è stato determinato sia il peso fresco della pianta (fusto, fittone e

radici residue) dopo l'intervento di potatura iniziale, che il peso secco della parte aerea e di quella radicale asportata.

Dopo il biennio di sperimentazione si è proceduto all'espianto, avendo cura di non alterare le condizioni del terriccio nell'intorno del gocciolatore; in laboratorio si è quindi proceduto alla misura della porzione aerea della vegetazione, come pure dell'apparato radicale (figura 3.1.4). I gocciolatori presenti all'interno dei vasi sono stati delicatamente disinstallati e sottoposti a prova, al fine di valutarne le prestazioni dopo due anni di utilizzo, come indicato nel seguente capitolo 3.3. Per quanto riguarda le piante, è stata in primo luogo asportata e misurata la parte aerea suddivisa in foglie, germogli, rami, tronco (figura 3.1.4b). Per effettuare la misura dell'apparato radicale è stata prestata molta attenzione alla rimozione del terriccio in modo da ridurre, quanto più possibile, la perdita delle radici assorbenti che risultano essere molto fragili. In una prima fase il terriccio è stato eliminato manualmente ed il restante è stato allontanato con un debole getto d'acqua fino all'ottenimento delle radici prive di residui (figura 3.1.4c). Il sistema radicale è stato separato in funzione della posizione all'interno del contenitore e suddiviso in fittone, radici secondarie con diametro (d) maggiore di 2 mm e radici fini ($d < 2$ mm).



Figura 3.1.4. Fasi di misura della vegetazione e dell'apparato radicale al termine del biennio di indagine: a) sviluppo della parte aerea della pianta; b) pianta dopo la misura della porzione aerea della vegetazione; c) pianta dopo la pulizia dell'apparato radicale.

Per ottenere il peso secco, le frazioni ottenute dalla parte aerea e radicale sono state essiccate in stufa a 60°C fino al raggiungimento di un peso costante. Per ogni pianta la nuova crescita (NC) è stata determinata come la somma del peso di radici fini, germogli e foglie. Sono stati inoltre determinati il rapporto tra il peso delle foglie, F, e quello delle radici, R, (F/R) e il rapporto tra il parametro NC ed il peso totale dell'albero, T, (NC/T).

Con lo scopo di monitorare l'eventuale presenza di radici in prossimità del gocciolatore, su tre vasi per ciascuna tesi e su entrambe le porzioni di suolo, sono stati predisposti due tubi in plexiglass del diametro di 40 mm, con caratteristiche ottiche note (figura 3.1.5a), per l'accesso di un minirizotrone progettato e costruito per lo scopo. La geometria dell'installazione, è stata progettata per poter osservare direttamente l'intorno del gocciolatore durante il periodo di utilizzo senza la necessità di perturbare le condizioni di crescita delle radici. Il prototipo di minirizotrone realizzato (figura 3.1.5b), adattato alle specifiche esigenze della ricerca è stato curato in tutti gli aspetti dalla progettazione dell'hardware alla realizzazione del software per l'acquisizione delle immagini. Lo strumento è stato realizzato con materiali a basso costo e si avvale di un processore con possibilità di connessione wireless e Bluetooth (Raspberry Pi Zero W), una fotocamera digitale (Logitech c270) e un sistema di illuminazione rappresentato da led bianchi, blu e ad infrarossi, inseriti in un involucro cilindrico, pure esso in plexiglass, del diametro di 34 mm. L'utilizzo di differenti led è stato ideato per l'acquisizione delle immagini a differenti lunghezze d'onda e per poter meglio discriminare le radici dalle altre componenti del suolo.

Il processo di prototipazione, ha portato a definire le principali caratteristiche dello strumento quali ad esempio: a) la distanza della fotocamera dal piano focale, che deve coincidere con la parete esterna del tubo in Plexiglass posizionato per l'ispezione all'interno dei vasi (figura 3.1.5c); b) la regolazione dello zoom ottico della fotocamera per ottimizzare la risoluzione dell'immagine alla scala di riferimento; c) la definizione della posizione e dell'intensità di illuminazione del campione attraverso i led (figura 3.1.5d); d) il software di acquisizione e salvataggio delle immagini; e) il sistema di schermatura dalla luce solare per evitarne l'interferenza durante le acquisizioni.

I rilievi si sono susseguiti durante i due anni di studio con intervalli di circa un mese tra un rilievo e l'altro. Per ogni rilievo, su ciascuna metà del volume radicale, sono state acquisite

tre immagini riprese con l'accensione di un led differente, per ciascuna delle quattro posizioni cardinali (nord, est, sud ed ovest), per un totale di 24 immagini per ogni vaso.

Per valutare la crescita radicale complessiva del periodo di osservazione, le immagini rilevate al termine dell'esperimento nelle quattro posizioni cardinali sono state analizzate con il software ImageJ; tali immagini, dopo calibrazione, hanno permesso di stimare l'area occupata dalle radici visibili all'interno della foto e la loro relativa lunghezza.

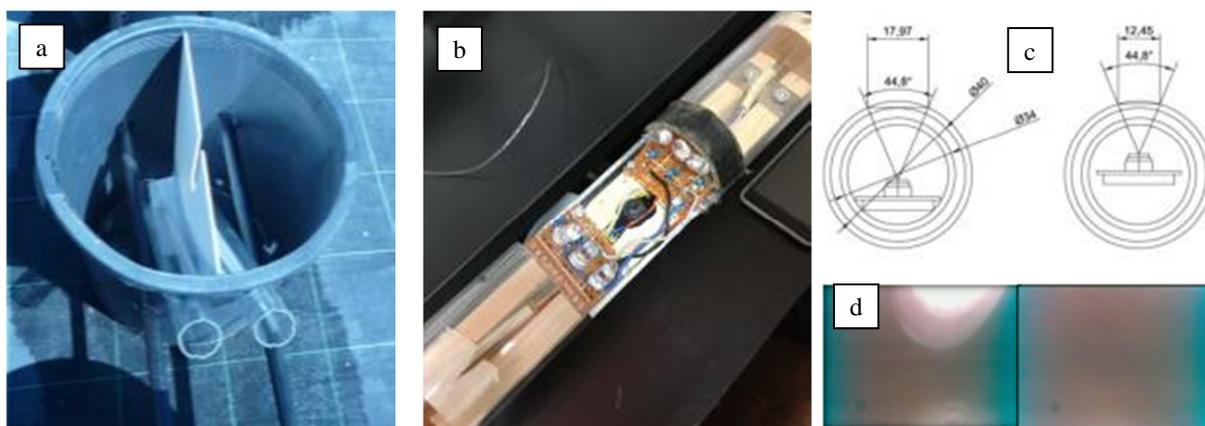


Figura 3.1.5. Sistema di monitoraggio della presenza di radici tramite minirizotrone: a) vaso con tubi in plexiglas per le ispezioni; b) particolare della fotocamera e dell'illuminazione del minirizotrone; c) geometria di acquisizione delle immagini tramite la fotocamera; d) correzione dell'illuminazione.

3.2 Installazione sperimentale di pieno campo

Il campo sperimentale ricade all'interno dell'area periurbana del comune di Palermo (figura 3.2.1 a), in un'area che storicamente è stata fortemente vocata per l'agrumicoltura, tanto da essere definita "Conca d'oro" grazie ai riflessi dorati delle foglie di agrumi durante il periodo estivo. Molte delle aree coltivate, all'interno del territorio, che presentano sestri di impianto irregolari con irrigazione a scorrimento superficiale, stanno subendo una progressiva riconversione per adeguarsi alle più moderne tecniche produttive. La riconversione degli agrumeti ancora presenti nell'area tende a razionalizzare i sestri di impianto per agevolare le operazioni meccanizzate ed a trasformare i sistemi d'irrigazione a scorrimento, ormai obsoleti, mediante l'introduzione di reti in pressione con utilizzo di spruzzatori, secondo il tradizionale

sistema denominato “a baffo” che prevede, per ogni pianta, la collocazione di due erogatori all’altezza di circa 50 cm dal suolo (figura 3.2.1b).

La sperimentazione è stata condotta all’interno di un agrumeto dell’età di circa 30 anni, ubicato in territorio di Villabate (38°4’53.4"N, 13°25’8.2"E), in provincia di Palermo. Il campo sperimentale, dell’estensione di circa 0,8 Ha, è impiantato a mandarino (*Citrus reticulata* Blanco) della varietà “Tardivo di Ciaculli”, con piante innestate su *citrange* ‘Carrizzo’ e sesto di impianto di 5 m per 5 m.



Figura 3.2.1. Area ad alta vocazione agrumicola ,“Conca d’Oro”, nei pressi di Palermo (a); irrigazione tradizionale a spruzzo sotto chioma (b).

L’agrumeto è stato suddiviso in otto parcelle, ciascuna delle quali contenente 32-40 piante, metà delle quali mantenute in assenza di deficit idrico (FI, da FI1 a FI4), mentre nell’altra metà è stata prevista l’applicazione di condizioni di deficit idrico (DI, da DI1 a DI4) nella fase II del ciclo fenologico, corrispondente al periodo di crescita precoce del frutto per distensione cellulare (figura 3.2.2).

Su ciascuna parcella, nel luglio 2017, è stato installato un impianto di subirrigazione costituito da due ali gocciolanti per filare interrate alla profondità di 30 cm, distanziate circa 1,1 m dal tronco, munite di gocciolatori auto-compensanti (modello Multibar C, Irritec) posti ad interdistanza di 0,5 m che, secondo quanto dichiarato dal costruttore, alla pressione di 150 kPa erogano una portata nominale di 2,1 l/h. Tre delle quattro tipologie di gocciolatori installati in campo, analoghi a quelli utilizzati per le prove in vaso, sono muniti di distinti

principi attivi finalizzati ad evitare l'intrusione radicale ed in particolare rame (Cu), Trifluralin (R1) e Preventol® (R2); è stata inoltre predisposta una tesi di controllo (C) con gocciolatori auto-compensanti (modello Multibar F, Irritec) senza alcun principio attivo.

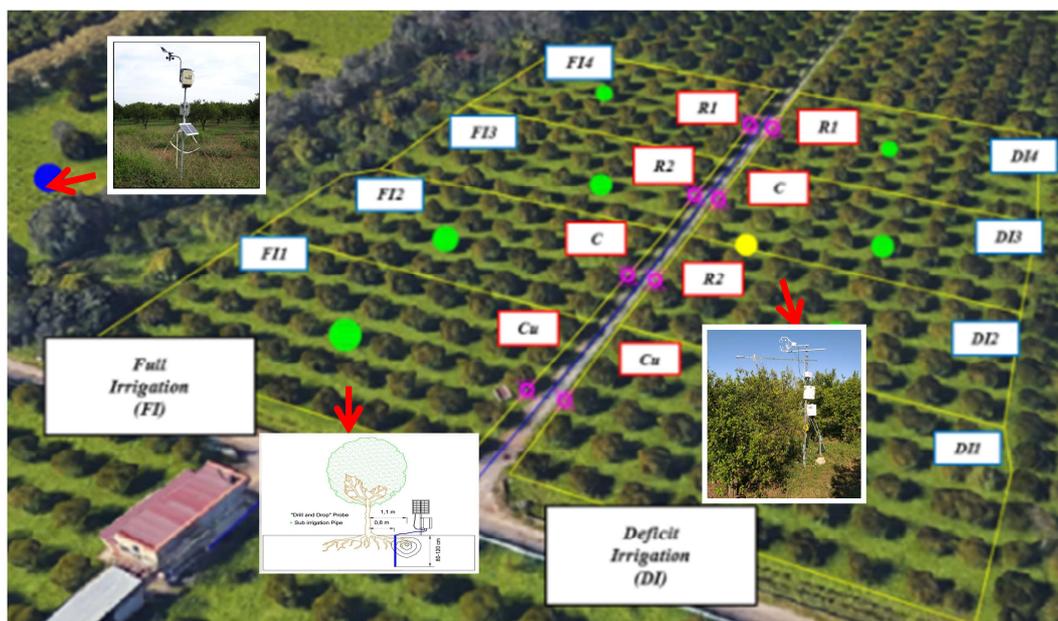


Figura 3.2.2. Installazione sperimentale di pieno campo. Sono indicati gli otto settori irrigui con i diversi modelli di erogatore (Cu, C, R1 ed R2), nonché i sensori per il rilievo dello stato idrico del suolo (punti in verde). E' altresì indicata la posizione della stazione climatica (punto in blue) e la torre per la misura dei flussi evapotraspirativi secondo la tecnica Eddy Covariance (punto in giallo).

In corrispondenza del nodo di ciascun settore irriguo sono stati installati un contatore volumetrico, un manometro, una valvola di chiusura manuale, una elettrovalvola, un filtro a dischi di 150 Mesh ed una valvola di sfiato a doppio effetto. Tutti i settori sono stati chiusi ad anello in modo da favorire l'uniformità di distribuzione delle portate erogate. Per garantire il corretto funzionamento in fase di avvio e di svuotamento dell'impianto, sulla condotta di collegamento posta al termine delle ali gocciolanti, sono stati installati uno sfiato a doppio effetto, una valvola per le eventuali operazioni di spurgo delle ali gocciolanti ed un manometro. Tutte le elettrovalvole sono state collegate ad una centralina di programmazione (Commander Evo Basic, Irritec) che permette di automatizzare l'intero sistema di

distribuzione. Inoltre, è stata prevista una centralina di fertirrigazione basata sul sistema Venturi, commercialmente denominata dal costruttore “Mini Dos”. L’impianto utilizza un serbatoio di accumulo della capacità di circa 22 m³, che può essere riempito all’occorrenza utilizzando le acque provenienti da un pozzo, condiviso con altri imprenditori agricoli della zona. Su un’ulteriore porzione di agrumeto è stato mantenuto operativo e monitorato il tradizionale sistema irriguo aziendale del tipo “a baffo” (TI), costituito da due spruzzatori per pianta che erogano una portata di 140 l/h alla pressione di 150 KPa. Il campo sperimentale è stato completato con gli strumenti e le apparecchiature, di seguito dettagliatamente descritte, utili al monitoraggio delle varie componenti del sistema Suolo-Pianta-Atmosfera, SPA (figura 3.2.2).

Al fine di valutare le curve granulometriche del suolo, sull’intera superficie oggetto di sperimentazione sono stati prelevati 51 campioni di suolo rimaneggiato nello strato compreso tra la superficie e 20 cm di profondità, secondo lo schema indicato in figura 3.2.3a (punti rossi). Inoltre, nei pressi di ciascuna sonda di umidità ed in corrispondenza di una sezione all’interno della tesi TI sono stati prelevati quattro campioni di suolo rimaneggiato rispettivamente alle profondità di 0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm e 60-80 cm (figura 3.2.3a, punti verdi).

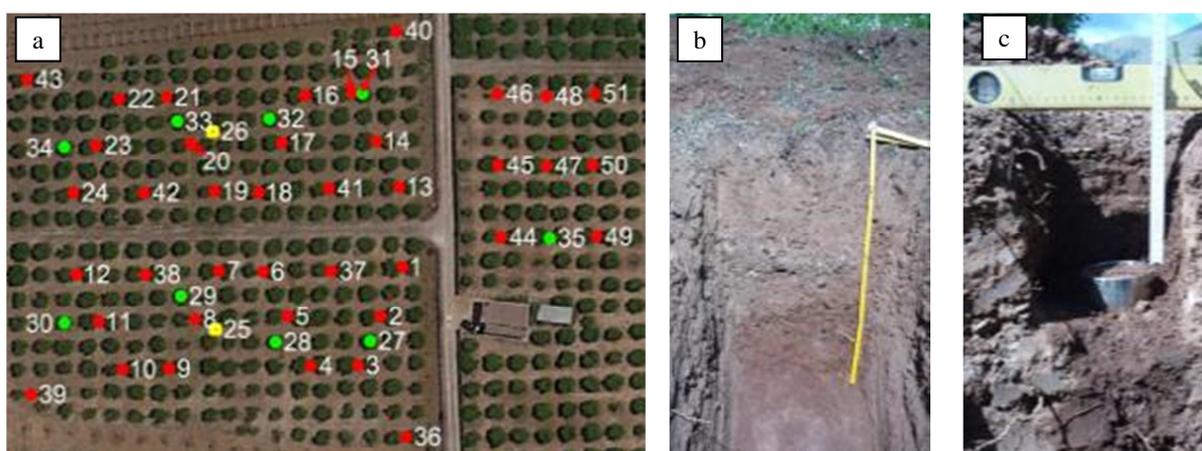


Figura 3.2.3. Misura delle caratteristiche fisiche del suolo; a) mappa di campionamento: in rosso i campioni superficiali 0-15cm, in giallo i profili pedologici, in verde i punti di campionamento nei pressi dei sensori di umidità; b) profilo di suolo; c) prelievo di campioni indisturbati di suolo, a diversa profondità, lungo i profili.

La determinazione della distribuzione granulometrica delle particelle di suolo è stata condotta presso il laboratorio di idrologia del Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari e Forestali dell'Università di Palermo utilizzando il metodo dell'idrometro (ASTM 152H), che ha permesso di identificare le classi tessiture e le frazioni di argilla, limo e sabbia, secondo la classificazione USDA. La metodologia adottata ha seguito i protocolli suggeriti nella normativa UNI-10006.

I dati relativi alle frazioni di argilla, limo e sabbia dei campioni prelevati nello strato superficiale sono stati quindi spazializzati utilizzando il metodo dell'inverso della distanza pesata, in modo da ottenere la mappa delle caratteristiche del suolo nell'area di indagine.

La determinazione delle curve di ritenzione è stata condotta su campioni cilindrici indisturbati del diametro di 8,0 cm ed altezza 5,0 cm, prelevati a diversa profondità (0-5 cm, 10-15 cm, 20-25 cm, 30-35 cm, 40-45 cm, 55-60 cm, 70-75 cm) in corrispondenza dei due profili aperti nella parte centrale dell'appezzamento (figura 3.2.4b,c).

I valori del contenuto idrico volumetrico θ , per fissato valore del potenziale matriciale ψ sono stati ottenuti utilizzando il metodo degli imbuti filtranti (Dane and Hopmans, 2002a) per i valori di potenziale prossimi alla saturazione ($\psi = 0$ cm) e fino a $\psi > -100$ cm, ed il metodo pressimetrico (Dane and Hopmans, 2002b) per i valori di ψ pari a -100 cm, -330 cm, -1000 cm e -15000 cm.

La caratterizzazione agro-climatica dell'area di studio è stata condotta utilizzando i dati della stazione climatica (Spectrum Technologies, Inc.) installata nei pressi dell'agrumeto nel giugno 2017 (figura 3.2.4a). La stazione acquisisce, con scansione semi-oraria, la direzione e la velocità del vento a 2 m, le altezze di precipitazione, la radiazione solare, la temperatura media e l'umidità relativa dell'aria.

Il monitoraggio dello stato idrico del suolo è stato condotto mediante l'utilizzo di otto sonde "drill & dropTM" (Sentek Pty, Ltd), installate una per ogni parcella. Le sonde permettono la misura dell'umidità e della temperatura del suolo ogni 10 cm di profondità, esplorando da 0-80 cm per le sonde installate in FI, e da 0-60 cm per quelle installate in DI.

Particolare cura è stata rivolta al posizionamento delle sonde rispetto alle ali gocciolanti interrate, in modo da permettere una misura rappresentativa delle condizioni di umidità del terreno durante e dopo ciascun intervento irriguo. A tal fine, la sezione dove collocare la sonda

è stata prescelta, in fase di installazione dell'impianto irriguo, ad una distanza di 30 cm dall'ala erogatrice ed in corrispondenza di un gocciolatore (figura 3.2.4b). Il sistema di acquisizione dei dati rilevati dalla stazione meteorologica e dalle sonde "drill & dropTM" è stato realizzato in modo da permetterne l'acquisizione da remoto e in tempo reale su pc o su cellulare, tramite l'utilizzo di una specifica applicazione (Agrinet, Tuctronics).

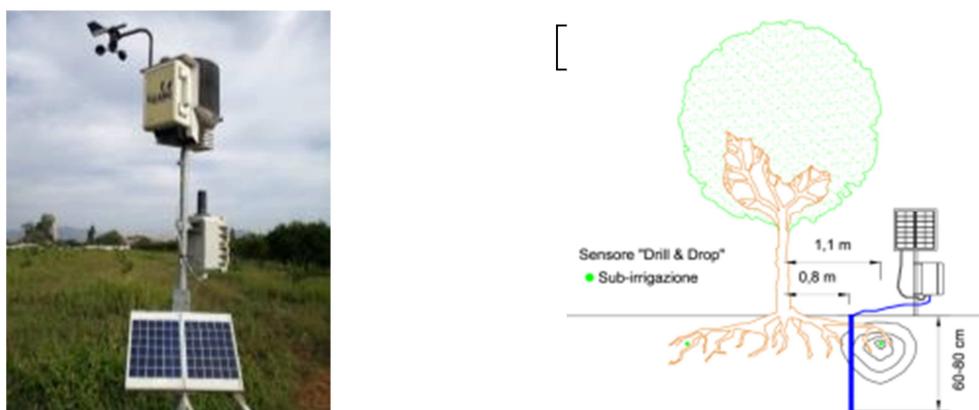


Figura 3.2.4. Strumenti di monitoraggio del sistema SPA installati in campo; a) stazione meteorologica; b) schema di installazione dei sensori di contenuto idrico e temperatura del suolo "drill & dropTM".

Le sonde "drill & dropTM", come pure la stazione meteorologica e l'intero sistema di trasmissione remota, sono stati gentilmente forniti della società Agrinet/Tuctronics (Walla Walla, WA, USA) (<http://www.grovision.com/AgriNET/Contact.html>).

Il monitoraggio dello stato idrico della pianta è stato effettuato utilizzando indicatori eco-fisiologici, quali il potenziale idrico xilematico e la misura dei flussi linfatici della pianta.

Negli anni 2018 e 2019, si è proceduto al monitoraggio, mediante la camera pressiometrica di Scholander (figura 3.2.5a), seguendo i protocolli di misura indicati da Turner e Jarvis (1982). Il rilievo dei potenziali fogliari "predawn" (ψ_{pd}) è stato effettuato poco prima del sorgere del sole. Sulle stesse piante, nelle ore più calde della giornata (13:00-15:00), si è proceduto al rilievo del potenziale idrico dell'asse (midday stem water potential, ψ_{stem}), circa 90 minuti dopo aver insacchettato i campioni da esaminare in sacchetti plastici opportunamente schermati con alluminio.

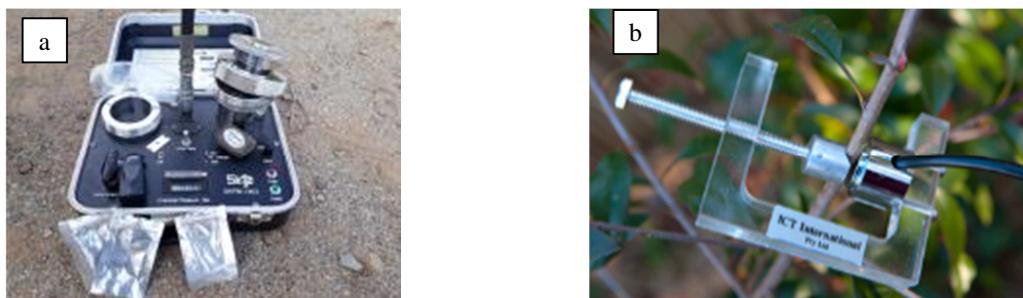


Figura 3.2.5. Strumenti di misura del potenziale idrico della pianta; a) camera pressiometrica di Scholander; b) psicrometro PSY1 ICT International.

Per le misure sono state utilizzati rametti di un anno con foglie non danneggiate da patogeni o eventi atmosferici. Il rilievo del potenziale è stato intensificato durante il periodo della stagione irrigua con 2-3 rilievi a settimana, mentre nel rimanente periodo è avvenuto con cadenza mensile. Queste misure sono state affiancate dalla misura in continuo del potenziale attraverso l'utilizzo di psicrometri PSY1 della ICT International (Armidale, NSW, Australia) (figura 3.2.5b). Lo strumento, grazie alla presenza di due termocoppie collegate in serie all'interno di una camera in ottone cromato che funge da massa termica isolante, permette la misura differenziale tra la temperatura del tessuto vegetale e la temperatura dell'aria della camera. Attraverso l'applicazione di una corrente di raffreddamento (effetto Peltier) e misurando la depressione psicrometrica (con bulbo umido) generata all'interno della camera, è possibile ottenere misure precise e ripetibili del potenziale idrico della pianta a scala oraria ed in continuo. Le acquisizioni sono state effettuate nel periodo da metà luglio agli inizi di ottobre nel 2019 su una pianta posta all'interno dei settori irrigui FI1, FI3, DI2 e DI3. I sensori in FI3 e DI2 sono stati installati a metà luglio, per seguire la prima parte dell'applicazione del deficit irriguo, mentre i sensori in FI1 e FI3 sono stati installati a metà agosto per seguirne le ultime fasi.

Gli psicrometri necessitano di preventiva calibrazione per tenere in considerazione della specificità costruttiva del sensore e delle micro asperità presenti all'interno della camera. La figura 3.2.6 mostra, per il sensore installato nella tesi DI2, la schermata del software di gestione utilizzata per identificare i parametri di calibrazione. La calibrazione è stata eseguita

in ambiente controllato, mediante l'applicazione, su carta assorbente, di soluzioni a concentrazione nota, così come indicato dalla casa costruttrice. Le misure sono state effettuate utilizzando il software di cui è dotato lo strumento, che ha permesso di identificare la relazione di calibrazione del sensore.

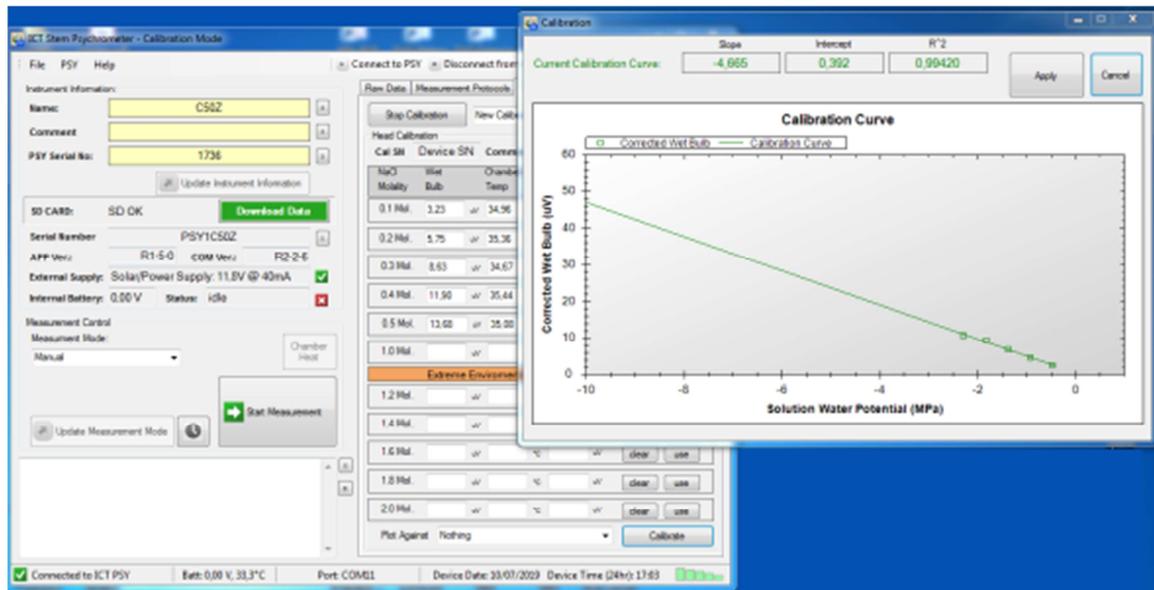


Figura 3.2.6. Schermata del software di gestione del sensore PSY1 e curva di calibrazione ottenuta mediante la misura di una porzione di carta assorbente imbevuta con soluzioni a concentrazione nota.

Particolare cura è stata dedicata all'installazione del sensore in campo, al fine di garantire il contatto di una delle due termocoppie presenti all'interno del sensore con il legno. Per una installazione ottimale è necessario prestare attenzione alla rimozione integrale della zona cambiale in modo da evitare crescite indesiderate di callo all'interno della camera, alla sigillatura della ferita e della camera con grasso di silicone, oltre che al corretto isolamento termico del sensore. La figura 3.2.7 mostra le varie fasi di installazione del sensore in campo.



Figura 3.2.7. Fasi dell'installazione in campo del sensore PSY1. Esposizione del legno, posizionamento della termocoppia; applicazione del grasso di silicone; installazione tramite staffa in policarbonato; isolamento termico del sensore.

Per completare le acquisizioni sulle condizioni dello stato idrico delle piante sono stati installati in campo 8 sensori per la stima del flusso linfatico (*sap-flow*, SF). Il metodo di misura è basato sulla dissipazione termica (Granier, 1985) e utilizza sensori costituiti da una coppia di aghi, inseriti nell'alburno (legno tenero), ciascuno contenente una termocoppia e avvolti con un rivestimento resistivo (figura 3.2.6a). La differenza di temperatura, ΔT , che si genera tra il sensore superiore (costantemente riscaldato) e quello inferiore (che registra la temperatura del legno) rappresenta un indice dell'attività traspirativa della pianta, espressa come variazione della densità di flusso, u [cm/min].

I sensori sono stati installati su quattro piante, rispettivamente nei settori FI1, FI3, DI1 e DI3 in modo da valutare i consumi traspirativi di piante sottoposte a differente stato idrico. Per ogni pianta sono stati installati due sensori, uno in posizione Nord ed uno in posizione Sud (figura 3.2.8b), posizionati rispettivamente sul tronco (FI1 e DI1) e sulla branca esposta a sud (FI3 e DI3), gli stessi sono stati opportunamente schermati (figura 3.2.8c) in modo da garantirne l'isolamento termico.

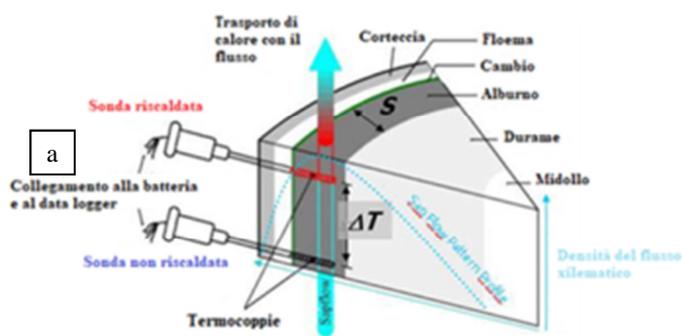


Figura 3.2.8. Installazione dei sensori *sap-flow*; a) schema di funzionamento; b) installazione delle sonde; c) sistema di isolamento delle sonde.

Per l'applicazione del metodo Granier è necessario il raggiungimento dell'equilibrio termico tra sensori e pianta. Nelle condizioni di flussi ridotti o del tutto assenti, questa condizione si verifica non prima di aver raggiunto i 30 minuti di funzionamento del riscaldatore (Do and Rocheteau, 2002a). Per ridurre il consumo energetico dei sensori, tenendo conto delle considerazioni fatte in precedenza sulla durata minima del riscaldamento, il rilievo tramite i sensori di *sap-flow*, durante il 2018, ha seguito un protocollo di misura basato su cicli di riscaldamento e raffreddamento di un ora ciascuno. I dati, registrati ogni 10 minuti, sono stati elaborati per valutare la densità di flusso, u [cm/min], seguendo la procedura proposta da Granier (1985).

Nel 2019, al fine di ridurre ulteriormente i consumi energetici e permettere il monitoraggio in tempo reale dei dati ottenuti mediante i sensori *sap-flow* è stato sviluppato un sistema di acquisizione basato su componentistiche a basso costo e facilmente reperibili sul mercato. Lo sviluppo e la versatilità dei nuovi modelli di micro-controller ha permesso di implementare un efficace strumento per l'acquisizione, l'elaborazione e la trasmissione dei dati ottenuti da sonde in luogo dei sofisticati e costosi datalogger utilizzati in precedenza. I micro-controller odierni, parallelamente alla diminuzione delle dimensioni, hanno subito un'evoluzione che esponenzialmente ha portato, nel giro di pochi anni, all'aumento della capacità di calcolo, della memoria interna, delle funzionalità di comunicazione (bluetooth, wifi), e di

connessione con altri dispositivi. Così come i micro-controller, anche le altre componenti del sistema (amplificatori, regolatori, ecc.) hanno subito un processo di miniaturizzazione, migliorando nel contempo le prestazioni generali.

La figura 3.2.9 riporta il circuito stampato del dispositivo sviluppato per l'acquisizione, l'elaborazione e la trasmissione dei dati ricevuti dai sensori *sap-flow*.

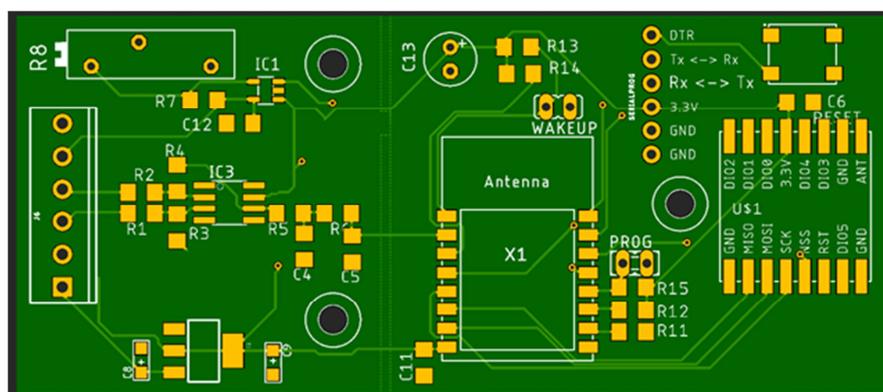


Figura 3.2.9. Circuito stampato della stazione di acquisizione dati dei *sap-flow*.

La stazione di misura dei flussi traspirativi è stata progettata per ridurre al massimo il consumo energetico, ed essere uno strumento flessibile ai fini della ricerca grazie alla possibilità di riprogrammazione. Infatti la stessa configurazione, con le opportune modifiche nel software può permettere di utilizzare i diversi protocolli di misura proposti in letteratura per la misura del *sap-flow*: Granier (1985), TTD nelle sue varianti dual (Do and Rocheteau 2002a, 2002b) e single probe (Do et al 2011) o altri protocolli sperimentali basati sugli stessi principi fisici (Lubczynski et al. 2012; Reyes-Acosta et al. 2012).

Il sistema, alimentato da batterie al litio di 3,7 V ricaricate in campo da pannelli solari, utilizza il micro-controller ESP8266 (Espressif), progettato per garantire una lunga durata e un ridotto consumo grazie a tre modalità di funzionamento: active mode, sleep mode e deep sleep mode. Il sistema compatto presenta un processore 32-bit, e la possibilità di connessione wi-fi. Per consentire la trasmissione wireless dei dati, la stazione è stata dotata di una radio LoRaTM RFM95W (Hoperf Eletronic). La tecnologia LoRaTM permette l'installazione dei sensori a distanze molto elevate dalla stazione ricevente, garantendo inoltre la possibilità di acquisizione in simultanea di un grande numero di sensori. Particolare attenzione è stata

riservata alla parte di amplificazione del segnale inviato dai sensori e alla parte di regolazione della potenza da applicare al riscaldatore della sonda.

La figura 3.2.10a,b riporta gli schemi elettrici semplificati della sezione di amplificazione del segnale proveniente dalle termocoppie (a) e lo schema elettrico del regolatore di tensione che alimenta il riscaldatore delle sonde (b). L'amplificatore utilizzato (OPA388S, Texas Instruments) è un amplificatore operazionale con basso rumore utilizzato nella sua configurazione differenziale con un'amplificazione del segnale pari a 1446.

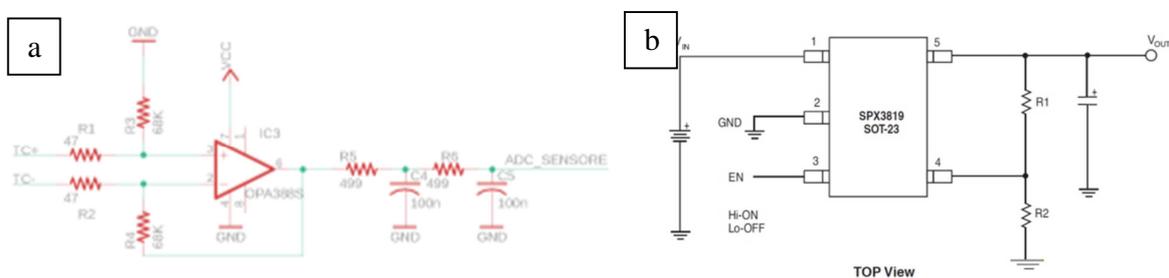


Figura 3.2.10 Schema elettrico delle componenti dell'amplificazione del segnale (a); schema elettrico del regolatore di tensione utilizzato per l'alimentazione del riscaldatore delle sonde.(b).

Il regolatore di tensione SPX3819 (Maxlinear) presenta caratteristiche quali il low drop-out, low noise e la presenza di una linea di attivazione, essenziali per garantire una potenza costante al riscaldatore anche con bassi voltaggi e la possibilità di attivazione e spegnimento del riscaldatore in funzione del protocollo di misura utilizzato. Inoltre il dispositivo è stato dotato di un orologio RTC DS3231 (Maxim).

La stazione ricevente è composta da una radio LoRaTM RFM95W (Hoperf Eletronic), da un micro-controller ESP32 (Espressif) dotato di una potenza maggiore e un numero di porte più elevato, per permettere la connessione oltre che dell'orologio RTC DS3231 (Maxim), oltre che di un controller di schede microSD OpenLog per l'archiviazione in locale dei dati.

L'applicazione in campo della stazione di acquisizione dei dati ha seguito il protocollo di misura TTD proposto da Do and Rochetau (2002a, 2002b), con un periodo di 10 minuti di riscaldamento seguito da un periodo di 10 minuti di raffreddamento.

La figura 3.2.11 riporta, a titolo di esempio, due cicli di riscaldamento-raffreddamento misurati durante la stagione 2019, le cui fasi stazionarie sono identificate in rosso.

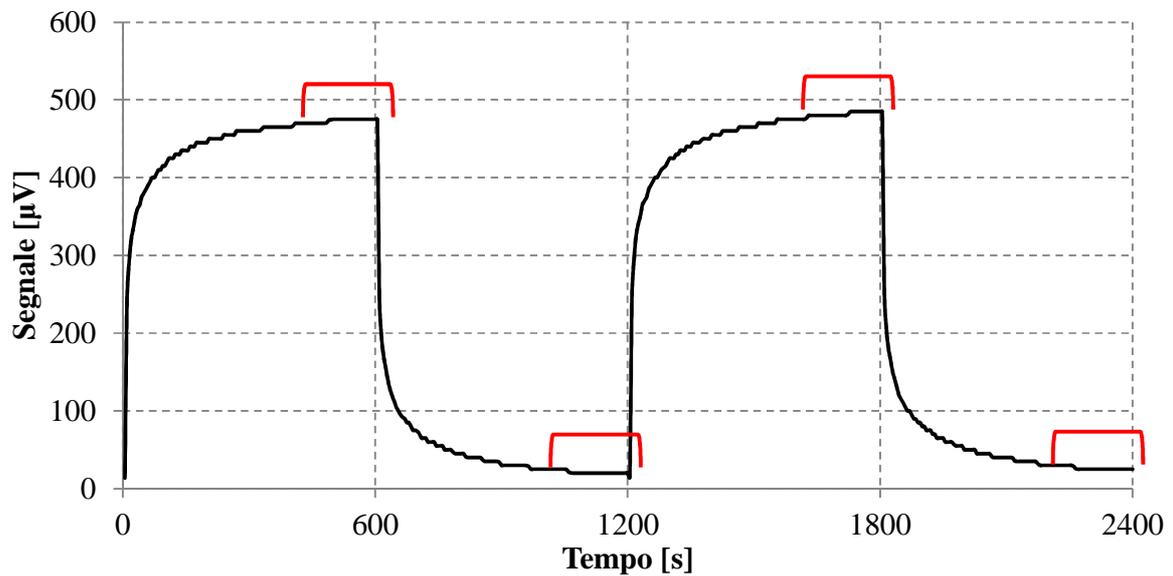


Figura 3.2.11. Andamento temporale del segnale proveniente dal sensore, con cicli di 10 minuti con riscaldatore acceso e 10 minuti con riscaldatore spento. In rosso sono ripotate le fasi stazionarie del ciclo.

Il software di acquisizione è stato implementato utilizzando le librerie per Arduino pubblicate dalla casa madre del micro-controller (Espressif). Il programma esegue l'accensione e lo spegnimento del riscaldatore ciclicamente ogni 10 minuti. L'acquisizione del segnale avviene con intervalli di 5 secondi. Per tenere conto delle fase stazionaria sugli ultimi 15 valori del ciclo viene automaticamente eseguita la media e calcolata l'intercetta e la pendenza della regressione lineare sulle ultime 15 acquisizioni. I parametri della regressione consentono di stabilire se si sono verificate le condizioni di stazionarietà richieste per la misura.

I dati acquisiti seguono due diversi percorsi: il primo finalizzato alla registrazione su una partizione di memoria del micro-controller dei dati grezzi ottenuti ogni 5 secondi interponendo, tra un ciclo e l'altro, la data e l'ora di inizio del ciclo. La memorizzazione dei dati grezzi non è normalmente necessaria, ma la si è ritenuta utile ai fini di salvaguardare una possibilità di rianalisi dei dati e per la verifica e la ottimizzazione dei cicli di misura. Al contempo, le serie temporali grezze sono elaborate ed inviate alla stazione ricevente alla quale pervengono i dati relativi alla media ed ai parametri della regressione lineare calcolati

separatamente per le fasi di riscaldamento e raffreddamento. Nella ricevente il dato viene archiviato su scheda SD indicando: l'orario di acquisizione i dati della stazione (id, sonda, pianta, tesi, etc.) e il valore differenziale delle termocoppie misurato dai sensori. Gli stessi dati, utilizzando un apposito formato ed un protocollo di trasmissione, vengono inviati ad un server attraverso una connessione internet tramite SIM dati, ed archiviati in un database accessibile in remoto. Seguendo le indicazioni proposte da Lu et al. (2004), durante l'installazione in campo, per ridurre al minimo le influenze del gradiente termico naturale, i sensori sono stati posizionati sulle branche una altezza di circa 70 cm dal suolo, garantendo un isolamento termico della porzione di branca e dell'intero tronco fino al suolo e verificando che non ci siano radici esposte che posano accumulare, e trasferire calore nel flusso linfatico.

Il metodo di misura utilizzato è l'evoluzione del TTD (Transient Thermal Dissipation) proposto da Do and Rocheteau (2002a, 2002b) che utilizza lo stesso tipo di sensori del metodo Granier, ma piuttosto che attivare in modo continuo l'elemento riscaldante lo utilizza in condizioni transitorie con cicli brevi di riscaldamento e raffreddamento (almeno 10 minuti di riscaldamento e 10 minuti di raffreddamento). Il transiente del segnale che viene determinato (dT) è la variazione relativa della temperatura rispetto al riscaldamento periodico, cioè la differenza del differenziale di temperatura letto alla fine dei periodi di riscaldamento (ΔT_h) e di raffreddamento (ΔT_c):

$$dT = \Delta T_h - \Delta T_c \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.2.1)$$

In analogia con il metodo Granier, il transiente del segnale è normalizzato rispetto al suo valore registrato durante il periodo del giorno con assenza di flusso, generalmente la notte, secondo l'indice K calcolato:

$$K = \frac{dT_o - dT_u}{dT_u} \quad [-] \quad (3.2.2)$$

dove dT_o è il segnale ottenuto in condizioni di assenza di flusso e dT_u è quello misurato per dati valori di densità di flusso, u .

L'indice termico K può essere utilizzato nella formula proposta da Isarangkool Na Ayutthaya et al. (2010), che si pone come un avanzamento al lavoro originale di Do and Rocheteau (2002a, 2002b). Secondo tale metodo la densità di flusso linfatico (u) è ottenuta moltiplicando l'indice termico K per un coefficiente calcolato sperimentalmente dagli autori su diverse specie e tramite prove di laboratorio:

$$u = 12,95 K \quad [\text{dm/h}] \quad (3.2.3)$$

I recenti avanzamenti su questa tecnica proposti da Do et al. (2018), che ampliano le specie utilizzare e le prove di laboratorio, propongono un nuovo indice termico, K_2 , calcolato come:

$$K_2 = \frac{dT_o - dT_u}{dT_o} \quad [-] \quad (3.2.4)$$

dove i simboli riportati assumono lo stesso significato di quelli espressi in precedenza, proponendo un nuovo coefficiente per il calcolo della densità di flusso:

$$u = 6,42 K_2 [\text{dm/h}] \quad (3.2.5)$$

Un altro metodo di calcolo, che è possibile applicare utilizzando la stessa base di dati, segue il procedimento proposto da Lubczynski et al. (2012) che utilizza i coefficienti della formula empirica ricavata da Granier (1985) per il calcolo della densità di flusso:

$$u = 0.714 K_L^{1.231} [\text{cm/min}] \quad (3.2.6)$$

Il valore dell'indice termico K_L tiene in considerazione il gradiente naturale della temperatura presente nell'intorno del sensore, e assume la seguente formulazione:

$$K_L = \frac{\Delta T_{ON}^c \max - \Delta T_{ON_i}^c}{\Delta T_{ON_i}^c} \quad [-] \quad (3.2.7)$$

dove $\Delta T_{ON\ max}^c$ è il segnale ottenuto in condizioni di assenza di flusso e $\Delta T_{ON_i}^c$ è quello misurato per dati valori di densità di flusso, u , entrambi corretti per il gradiente termico naturale.

Il segnale $\Delta T_{ON_i}^c$ corretto dalle interferenze del gradiente termico naturale, viene calcolato:

$$\Delta T_{ON_i}^c = \Delta T_{ON_i}^E - \Delta T_{NGT_i}^E \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.2.8)$$

dove $\Delta T_{ON_i}^E$ è l'estrapolazione (indicata con indice E) dei dati misurati fino al raggiungimento della fase stazionaria durante il ciclo di riscaldamento (indicato con pedice ON) del transiente *i-esimo*, ed rappresenta la somma del reale valore di ΔT più il valore del gradiente termico naturale; e $\Delta T_{NGT_i}^E$ è l'estrapolazione dei dati misurati fino al raggiungimento della fase stazionaria durante il ciclo di raffreddamento (indicato con pedice OFF) del transiente *i-esimo* ed rappresenta il valore del gradiente termico naturale (NTG) e viene calcolato come la media dei segnali dei cicli di raffreddamento precedente e successivo.

$$\Delta T_{NGT_i}^E = 0.5(\Delta T_{OFF_{i-1}}^E - \Delta T_{OFF_{i+1}}^E) \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.2.9)$$

I parametri $\Delta T_{ON_i}^E$ nell'equazione 3.2.8 e i parametri $\Delta T_{OFF_{i-1}}^E$ e $\Delta T_{OFF_{i+1}}^E$ dell'equazione 3.2.9 vengono calcolati come:

$$\Delta T_{ON_i}^E = \Delta T_{OFF_{i-1}} + A_1 \left(1 - e^{\left(-\frac{t}{T_1}\right)}\right) + A_2 \left(1 - e^{\left(-\frac{t}{T_2}\right)}\right) + A_3 \left(1 - e^{\left(-\frac{t}{T_3}\right)}\right) \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.2.10)$$

$$\Delta T_{OFF_{i-1}}^E = \Delta T_{ON_i} - \left[A_1 \left(1 - e^{\left(-\frac{t}{T_1}\right)}\right) + A_2 \left(1 - e^{\left(-\frac{t}{T_2}\right)}\right) + A_3 \left(1 - e^{\left(-\frac{t}{T_3}\right)}\right)\right] \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.2.11)$$

$$\Delta T_{OFF_{i+1}}^E = \Delta T_{ON_{i-2}} - \left[A_1 \left(1 - e^{\left(-\frac{t}{T_1}\right)}\right) + A_2 \left(1 - e^{\left(-\frac{t}{T_2}\right)}\right) + A_3 \left(1 - e^{\left(-\frac{t}{T_3}\right)}\right)\right] \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.2.12)$$

dove A1, A2, A3 e T1, T2, T3 sono dei coefficienti dell'equazione utilizzata per stimare il valore stazionario. Nella formulazione proposta dall'autore i coefficienti A e T rappresentano

rispettivamente l'ampiezza del segnale di picco della ΔT e la costante temporale del cilindro del legno conduttivo sotto studio. Per tenere in considerazione le varie parti del sistema, i coefficienti dell'equazione rappresentano fisicamente (i) il filamento del riscaldatore e tutti i componenti avvolti da questo filamento (cioè strato di isolamento e gruppo termocoppia) (A1 e T1); (ii) l'assemblaggio del tubo di alluminio e del composto di silicone conduttivo applicato per migliorare il contatto termico tra il filamento riscaldante e il tubo di alluminio (A2 e T2); e (iii) la porzione di alborno in contatto con la sonda di riscaldamento (A3 e T3) (Lubczynski et al., 2012). Nella figura 3.2.12, tratta da Lubczynski et al., (2012), vengono riportati in via esemplificativa una successione di tre cicli OFF – ON – OFF, dove vengono riportate in modo grafico tutte le variabili utilizzate nei calcoli.

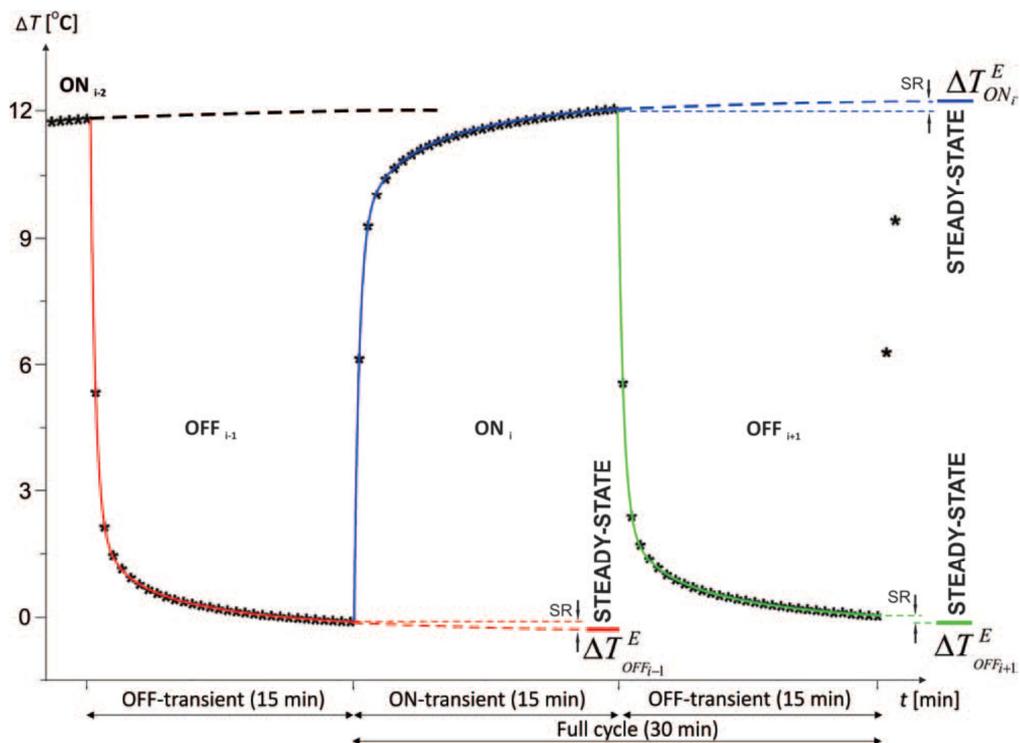


Figura 3.2.12. Campione di tre transitori, OFF - ON - OFF, rappresentati con colore diverso. Per ognuno è indicata l'estrapolazione fino al raggiungimento dello stadio stazionario (linea tratteggiata). SR, residuo di segnale, differenza tra l'ultimo ΔT misurato e ΔT estrapolato; $\Delta T_{ON_i}^E$, transiente ON estrapolato; $\Delta T_{OFF_{i-1}}^E$ e $\Delta T_{OFF_{i+1}}^E$ transiente OFF estrapolato; t, time (Lubczynski et al., 2012).

Al fine di definire le caratteristiche della vegetazione dell'appezzamento, sono stati misurati alcuni parametri biofisici della pianta. Per ogni pianta in cui è presente il sensore di umidità sono stati misurati i diametri nelle varie sezioni della pianta: colletto, punto di innesto, punto di imbrancatura, branche primarie e secondarie (figura 3.2.13a). Inoltre, sono stati misurati il volume e l'area di proiezione della chioma e l'indice di area fogliare (Leaf Area Index, LAI). Il LAI, in ambito eco-fisiologico è definito come la superficie fogliare presente per unità di superficie di proiezione della chioma ed è espresso in metri quadri di fogliame su metro quadro di suolo [m^2/m^2]. Tale parametro può essere messo direttamente in relazione alla crescita ed alla produzione primaria netta, poiché misura l'area fogliare che condiziona gli scambi di energia fra pianta ed ambiente. La misura del LAI si basa sulla misura della *gap fraction* o frazione delle aperture della chioma. La *gap fraction*, in corrispondenza di una particolare direzione della vegetazione è la frazione di cielo non ostruito da elementi della vegetazione. Può essere definita anche come la probabilità che un raggio di luce che passa attraverso la vegetazione non sia intercettato dalla chioma stessa, in una determinata direzione (Walter and Torquebau, 2000). La *gap fraction* varia da 0 (cielo completamente ostruito) a 1 (cielo completamente aperto).

Uno dei metodi più comuni per la misura del LAI si basa sulla legge di Lambert-Beer che presuppone che l'estinzione della luce attraverso la chioma sia esponenziale:

$$Q_r = Q_o e^{-kLAI} \quad [W/m^2] \quad (3.2.13)$$

nella quale Q_r è la densità di flusso radiante che arriva sotto la chioma, Q_o è la densità di flusso incidente sulla sommità della chioma e k è il coefficiente di estinzione.

Da tale relazione si ottiene:

$$LAI = -\ln(Q_i / Q_o) / k \quad [-] \quad (3.2.14)$$

Quindi, l'applicazione del metodo, oltre alle misure dirette sopra richiamate, presuppone la conoscenza o la stima del coefficiente k . Per una chioma con una distribuzione sferica dell'angolo di inclinazione delle foglie, il valore di k può essere assunto pari a 0,5.

Un altro modello per la stima del LAI è quello proposto da Norman e Campbell (1989) che si basa sulle stesse ipotesi della legge di Lambert-Beer, ma richiede la stima delle *gap fraction* corrispondente a due o più angoli zenitali; l'applicazione di tale modello permette di ottenere anche l'angolo medio di inclinazione delle foglie.

Nello specifico, i valori di *gap fraction* per un intervallo di angoli zenitali ϑ e di angoli azimutali α , $T(\vartheta, \alpha)$, possono essere determinati come:

$$T(\vartheta, \alpha) = \frac{P_s}{P_s + P_{ns}} \quad [-] \quad (3.2.15)$$

nella quale P_s è la frazione di cielo in una regione (ϑ, α) e P_{ns} è la corrispondente frazione di vegetazione. La stima delle *gap fraction* come funzione degli angoli zenitali è relativamente semplice con strumenti come il LAI-2000, dal momento che questi strumenti permettono di acquisire simultaneamente i valori del parametro in corrispondenza di diversi angoli, sia azimutali che zenitali. La misura però è fortemente influenzata dalle condizioni atmosferiche, soprattutto dalla nuvolosità o dall'eccesso di radiazione luminosa. Quindi, è preferibile effettuare il rilievo in un orario mattutino o nelle ore successive al picco radiativo.

Per tenere conto delle possibili asimmetrie presenti nella chioma, ogni albero è stato suddiviso in 4 sezioni, con angoli di 90° secondo l'esposizione verso i quattro punti cardinali. In queste sezioni e lungo la bisettrice sono stati misurati, in 8 punti, la distanza dal tronco e la relativa altezza della vegetazione in modo da ricostruire la sagoma della pianta (figura 3.2.13b). Secondo lo stesso schema, sono state effettuate misure indirette del LAI eseguite con il LAI-2000 Plant Canopy Analyzer (Li-Cor, Lincoln, NE, USA), oscurando parte del campo visivo del sensore per ottenere un angolo di visione di 90° coincidente con le sezioni delle piante individuate. Il rilievo è stato effettuato in assenza di vento e nuvole, tenendo conto della posizione del sole (sempre alle spalle) e l'orario di esecuzione (prima delle 11:00 e dopo le 17:00). I dati ottenuti sono stati elaborati attraverso il software FV2200 (figura 3.2.13b)

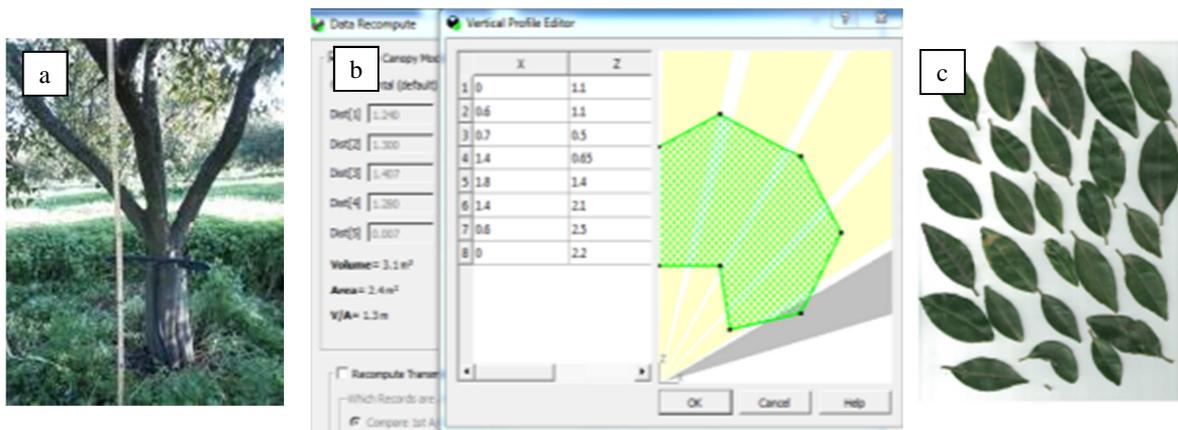


Figura 3.2.13. Rilievi morfologici sulla pianta. a) misura delle parti strutturali della pianta; b) elaborazione volume e area della pianta con il software FV2200; c) acquisizione immagini per la determinazione della superficie fogliare asportata tramite potatura.

Oltre alle piante indicate, per valutare la variabilità dei citati parametri biofisici all'interno del campo, i rilievi sono stati ripetuti su altre 3-4 piante per ogni parcella. Il rilievo è stato eseguito nella seconda metà di aprile, prima delle operazioni ordinarie di potatura.

Seguendo lo stesso schema di rilievo e sulle stesse piante in cui è stata effettuata la misura del LAI, sono stati prelevati i residui di potatura avendo cura di separarli rispettando la porzione di chioma dalle quali sono stati asportati (Nord, Est, Sud, Ovest). I campioni sono stati separati in foglie, germogli e rami sui quali è stato determinato il peso secco delle varie parti dopo essiccamento in stufa a 60° C, fino al raggiungimento di un peso costante. Per determinare la superficie fogliare asportata, sono state prelevati 6 campioni (3 in FI, 3 in DI) di 50 foglie fresche per ogni porzione di chioma (Nord, Est, Sud, Ovest) su piante scelte casualmente tra quelle monitorate nelle varie tesi. Le immagini delle foglie sono state acquisite con scanner ottico (figura 3.2.13c), e opportunamente processate con il software ImageJ, sviluppato dal National Institutes of Health (USA), al fine di determinare la superficie fogliare del campione, che è stata successivamente rapportata al relativo peso secco.

Un ulteriore rilievo vegetativo è stato effettuato alla fine del flusso estivo di crescita dei germogli, che si è verificato nella prima decade di settembre nel 2018 e nella prima decade di ottobre nel 2019 (figura 3.2.14).



Figura 3.2.14. Rilievo sullo sviluppo vegetativo estivo: a) sviluppo della vegetazione estiva, verde chiaro, in FI; b) misura della lunghezza di un germoglio estivo.

Il rilievo è stato effettuato per monitorare gli eventuali effetti dello stress idrico applicato sulle diverse tesi irrigue sulla crescita dei germogli durante il flusso vegetativo estivo. Per ciascuna tesi irrigua (FI, DI e TI) e su diverse piante all'interno del campo sono stati prelevati porzioni di rami, in posizione mediana della chioma, con esposizione sud e nord, in modo da valutare la possibile influenza dell'esposizione sulla crescita. In queste porzioni è stata determinata la lunghezza e il numero dei germogli sviluppati durante la primavera e quelli cresciuti durante il periodo estivo.

3.3 Prove sui gocciolatori

3.3.1. Caratterizzazione idraulica

I modelli di gocciolatore utilizzati nelle diverse prove sperimentali sono stati caratterizzati idraulicamente sulla base delle indicazioni fornite dalla norma ISO 9261:2010. Le prove sono state condotte presso il laboratorio del “Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria” dell'Università Politecnica di Valencia, durante il periodo formativo svolto all'estero.

La figura 3.3.1 mostra il layout sperimentale della strumentazione, in cui è possibile sottoporre a prova, simultaneamente, 25 erogatori installati orizzontalmente. Il sistema è composto da un serbatoio, una pompa centrifuga verticale (EVM3 9N5 / 1,1 kW, Ebara) dotata di un variatore di velocità (ALTIVAR 61 Schneider Electric), un sistema di raccolta e pesatura dei volumi erogati da ogni singolo gocciolatore e infine un secondo serbatoio che funge da accumulo collegato al serbatoio principale tramite una pompa di ricircolo (NÁCAR 400 MS 0,44 kW, Ebara). Per garantire l'assenza di materiale estraneo durante le prove sono stati installati due filtri a disco da 100 µm, il primo nella condotta di alimentazione ed il secondo in quella di ricircolo.

Un sistema di riscaldamento/raffreddamento, installato nel primo serbatoio è controllato da un termometro (Thermophant T TTR31, Endress + Hauser) con una precisione di 0,5°C, che ha permesso di mantenere la temperatura dell'acqua nell'intervallo $23^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$.

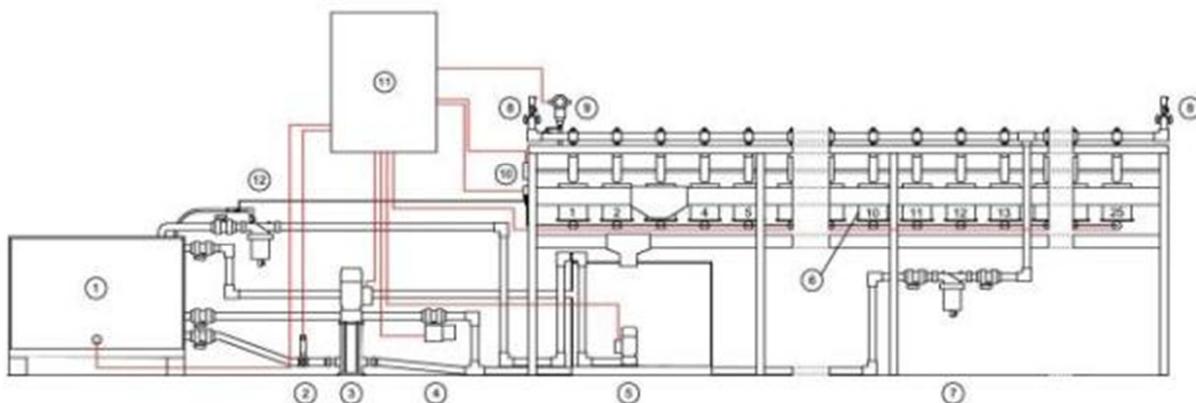


Figura 3.3.1. Schema banco prova ISO 9261:2010; 1) vasca di accumulo; 2) termometro digitale; 3) pompa e variatore di velocità; 4) valvola di regolazione; 5) vasca di ricircolo con pompa; 6) contenitore con bilance di precisione; 7) filtro a dischi 130 Mesh (100 µm); 8) sfiati; 9) manometro digitale; 10) sistema pneumatico di apertura e chiusura valvole; 11) centralina di controllo; 12) filtro a dischi.

Il volume erogato da ogni gocciolatore è raccolto in un contenitore di polipropilene da 8 litri e pesato tramite una cella di carico (M120, Utilcell) con una precisione di 2 g nell'intervallo di peso da 0 a 15 kg; ogni contenitore è stato dotato di valvole pneumatiche che consentono il riempimento e lo svuotamento automatico. La pressione nelle condotte è monitorata da un manometro (Cerabar PMP71-Platino, Endress + Hauser) con una precisione

di $\pm 0,05\%$ nell'intervallo 0-1000 kPa. Il circuito, completo di elettrovalvole, manometri e contatori volumetrici, è stato progettato per essere gestito con il software LabView 2013 per un utilizzo semi-automatico. Il sistema di gestione del banco prova è basato su un'interfaccia semplice e sulla possibilità di controllo remoto. La raccolta dei dati e il controllo del sistema avviene tramite un controller in tempo reale (modello Compact RIO 9073, National Instruments). Maggiori dettagli sul layout sperimentale sono disponibili in Balbastre et al. (2015).

Un'ulteriore analisi ha riguardato la determinazione delle perdite di carico, continue e localizzate, che si determinano lungo le ali gocciolanti installate in campo. Le prove sono state condotte utilizzando l'impianto sperimentale mostrato figura 3.3.2, che ha permesso di misurare le perdite di carico lungo le ali gocciolanti con erogatori non sigillati, di diametro 20 mm e lunghezza nota (circa 7 m) sulle quali sono stati installati, ad interdistanza di 50 cm, i modelli di gocciolatore Multibar C e Multibar F (Irritec s.p.a), con portata nominale di 2,1 l/h utilizzati per le prove di pieno campo.

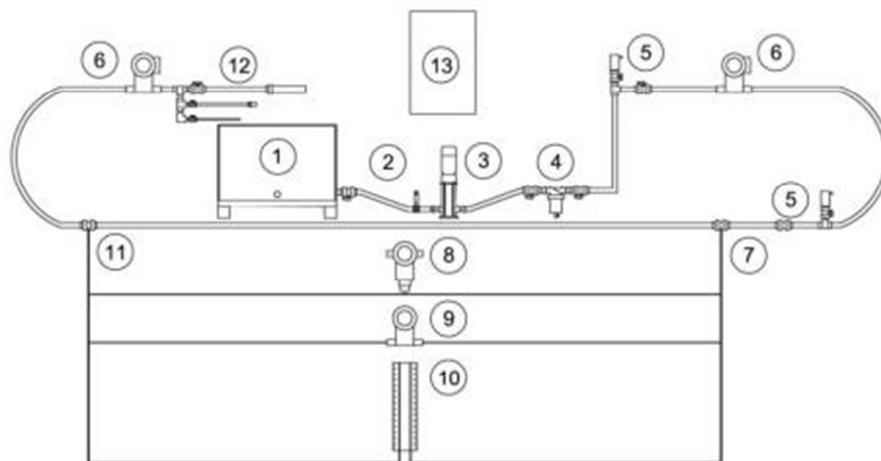


Figura 3.3.2. Impianto sperimentale per la misura delle perdite di carico; 1) vasca di accumulo; 2) termometro digitale; 3) pompa e variatore di velocità; 4) filtro a dischi 130 Mesh (100 μm); 5) sfiati; 6) misuratore di portata; 7) attacco porta-manometro P1; 8) manometro digitale; 9) manometro differenziale digitale; 10) manometro differenziale ad acqua; 11) attacco porta-manometro P2; 12) valvole di regolazione; 13) centralina di controllo.

Il sistema è composto da un serbatoio, una pompa centrifuga verticale (EVM3 9N5 / 1,1 kW, Ebara) dotata di un variatore di velocità (ALTIVAR 61 Schneider Electric), filtro a dischi

da 100 μm , degli sfiati per l'allontanamento dell'aria dalla condotta e un sistema di riscaldamento/raffreddamento, controllato da un termometro (Thermophant T TTR31, Endress + Hauser) con una precisione di $0,5^{\circ}\text{C}$, che ha permesso di mantenere la temperatura dell'acqua nell'intervallo $23^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$.

Le pressioni in condotta sono state monitorate da un manometro digitale (Cerabar PMP71-Platino, Endress + Hauser) con una precisione di $\pm 0,05\%$ nell'intervallo 0-1000 kPa, mentre la portata è stata monitorata attraverso due misuratori di portata digitali (Promag 53H, Endress+Hausen), posti all'ingresso e alla fine del circuito idraulico.

Per ciascuna ala gocciolante, le perdite di carico sono state misurate utilizzando un manometro differenziale ad acqua ed un manometro differenziale digitale (Deltabar S PDM75, Endress+Hausen) installati tra la sezione iniziale (P1) e quella terminale (P2) del tratto sottoposto a prova e per diversi valori della portata immessa in condotta.

La tubazione è stata collegata con un supporto rigido, per evitare possibili flessioni, con una pendenza dello 0,002% per facilitare la rimozione dell'aria in fase di avviamento dell'impianto. Per la regolazione della pressione e della portata sono stati utilizzati il variatore di velocità e tre valvole disposte in parallelo dotate di filtro per la dissipazione d'energia, poste alla fine del circuito idraulico. Il filtro si è reso necessario per ridurre l'influenza della turbolenza del flusso d'acqua in uscita sulla misura della portata.

La prima prova è stata effettuata imponendo alla sezione P1 la pressione corrispondente al valore della pressione di inizio dell'autoregolazione (dati del costruttore) ed una portata in uscita pari a zero. Le perdite di carico complessive lungo il tronco di condotta sono state misurate utilizzando i diversi manometri rappresentati ai punti 8, 9, 10 della figura 3.3.2. Successivamente, al fine di riprodurre il comportamento di un'ala gocciolante di lunghezza maggiore, i valori di pressione e portata misurati all'inizio della condotta (Q_i , P_i) nel corso della prima prova, sono stati preimpostati in corrispondenza della sezione finale del tratto sottoposto a prova. Non appena raggiunta la condizione di stazionarietà, è stata effettuata la misura della nuova coppia di valori di portata e pressione nella sezione di ingresso (Q_{i+1} , P_{i+1}) e misurata la perdita di carico associata alla nuova condizione idraulica. Si è proceduto in questo modo fino a raggiungere il valore massimo di pressione per l'ala gocciolante o la portata massima convogliabile mediante l'installazione sperimentale, pari a circa 800 l/h.

3.3.2 Effetti dell'intrusione radicale sulle performance dei gocciolatori

Al fine di valutare l'efficacia dei differenti principi attivi anti-radice inglobati all'interno dei gocciolatori in fase di realizzazione, sono stati sottoposti a prova gli stessi gocciolatori precedentemente installati in vaso ed utilizzati per le prove descritte nel capitolo 3.1 (figura 3.1.2). I gocciolatori, opportunamente prelevati dai vasi in modo da preservare l'eventuale presenza di radici all'interno del gocciolatore, sono stati sottoposti a prova presso il laboratorio dell'azienda Irritec s.p.a, al fine di determinare la relazione portata-pressione, $Q(P)$, e per rilevare l'eventuale presenza di radici nel labirinto interno al gocciolatore. Il test è stato eseguito entro le 36 ore successive all'asportazione dal vaso in modo da prevenire eventuale disseccamento della radice presente e alterazione dei risultati. I campioni sono stati esaminati utilizzando il banco prova illustrato in figura 3.3.3a, costituito da un sistema di accumulo dell'acqua, un filtro a dischi 130 mesh, un sistema di controllo della temperatura durante la prova, una pompa, un sistema di stabilizzazione delle pressione, delle valvole automatiche per la regolazione, 8 vasche di accumulo in acciaio dotate di celle di carico (figura 3.3.3b) e di un sistema automatico di svuotamento. Tutte le apparecchiature installate nel banco prova sono gestite da un software dedicato realizzato dai tecnici dell'azienda e sono state predisposte per rispondere agli standard dettati dalla citata norma ISO9261:2010.

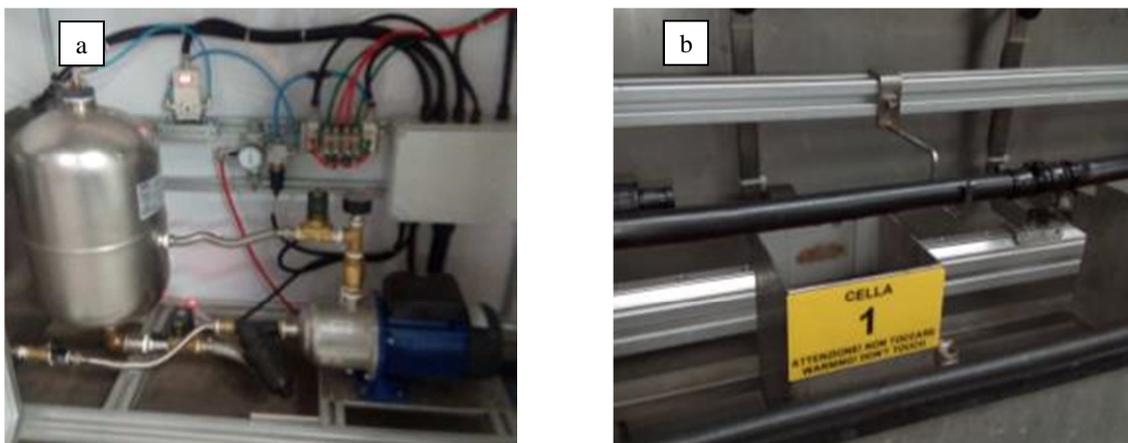


Figura 3.3.3. Banco prova utilizzato per caratterizzazione idraulica dei gocciolatori precedentemente installati in vaso. a) particolare della strumentazione; b) cella per l'accumulo dei volumi e la misura delle portate erogate.

Le portate dei gocciolatori esaminati sono state misurate inizialmente per valori di pressione crescenti da 20 kPa a 400 kPa e successivamente decrescenti da 400 kPa a 20 kPa. In particolare, è stato utilizzato un intervallo di 20 kPa per le pressioni di prova da 20 kPa a 100 kPa e l'intervallo di 50 kPa per le pressioni comprese tra 100 kPa a 400 kPa. Le relazioni $Q(P)$ così ottenute sono state quindi confrontate con le corrispondenti valutate su 25 gocciolatori nuovi. Prima dell'avvio del test, il foro di uscita del gocciolatore è stato fotografato con un microscopio digitale (Mic-Fi, Italeco), come mostrato in figura 3.3.4a, in modo da riscontrare visivamente l'eventuale intrusione radicale. La stessa immagine è quindi stata acquisita dopo avere condotto il test, in modo da valutare gli eventuali effetti della prova.

Al fine di rilevare la presenza di radici, la tubazione in polietilene all'esterno del gocciolatore è stata rimossa con l'ausilio di un mini trapano elettrico (figura 3.3.4b) in modo da lasciare una sottile pellicola di PE in contatto con il gocciolatore (figura 3.3.4c). Infine, quest'ultima è stata rimossa con un cutter di precisione esponendo i percorsi idraulici del gocciolatore (figura 3.3.4d). Le radici rilevate sono state quindi fissate con colla al cianoacrilato per impedire il movimento e possibili perdite e quindi misurate con un calibro di precisione.

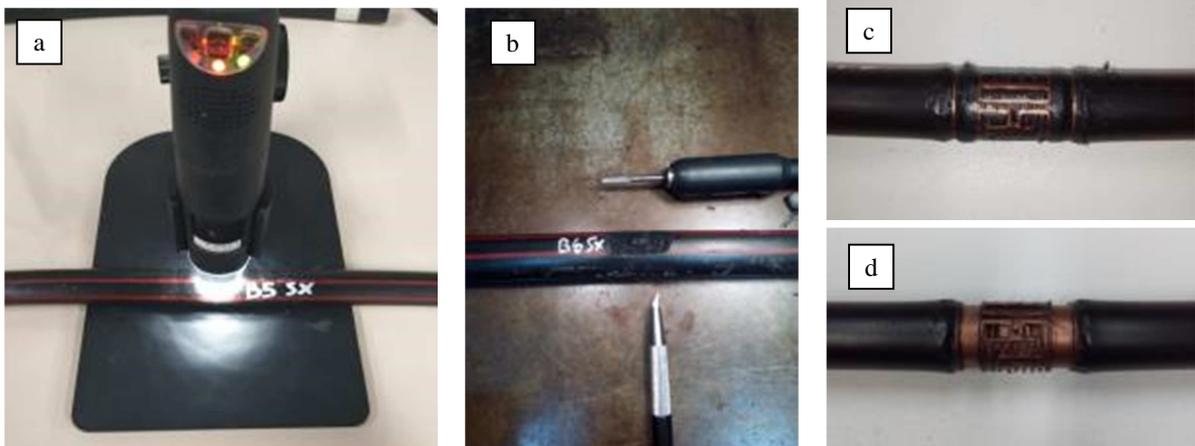


Figura 3.3.4. Strumenti utilizzati per il rilievo delle radici all'interno del gocciolatore. a) microscopio elettronico; b) strumenti utilizzati per la rimozione della tubazione di polietilene; c) gocciolatore con film di PE; d) parte interna del gocciolatore completamente esposta.

Al fine di valutare gli eventuali effetti dell'intrusione radicale e dell'invecchiamento dei gocciolatori installati in pieno campo, si è proceduto al monitoraggio nel tempo della portata media dei gocciolatori installati nelle diverse parcelle sperimentali già descritte nel paragrafo 3.2.

Durante le due stagioni irrigue e per ciascun intervento irriguo sono stati monitorati i volumi erogati, come pure le pressioni in corrispondenza di due sezioni dell'impianto, la prima delle quali in prossimità della testata di comando del settore e la seconda posta in corrispondenza della mezzeria della condotta di chiusura, posizionata nella parte opposta del settore irriguo. Per garantire la massima efficienza del sistema è stato previsto un monitoraggio e una pulizia periodica del sistema di filtraggio. Inoltre, per valutare possibili influenze della fase di riempimento sulla misura della portata media, sono stati rilevati i valori delle volumi erogati in diversi momenti nel corso degli adacquamenti.

4. Risultati e discussione

4.1 Prove in vaso

Al fine di valutare i possibili effetti sulla crescita della pianta dei vari principi attivi anti-radice utilizzati nell'indagine, si è reso necessario garantire la massima uniformità tra le piante messe a dimora all'interno dei vasi. La tabella 4.1.1 riporta, al momento del trapianto, le medie e le deviazioni standard dei diametri misurati in due punti del tronco, al colletto e nel punto di potatura, il peso fresco dell'intera pianta privata della vegetazione e di parte delle radici.

Tabella 4.1.1. Medie e deviazioni standard del diametro del colletto (DC), del diametro della sezione di potatura del fusto (DF) e del peso fresco delle piante private della vegetazione e di parte delle radici (P).

Trattamento	DC [cm]		DF [cm]		P [g]	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ
Controllo	1,63	0,08	1,07	0,12	152,17	60,26
Cu	1,73	0,15	1,12	0,10	146,83	46,17
CY1	1,67	0,05	1,10	0,06	146,00	20,08
CY2	1,63	0,08	1,07	0,05	133,17	30,75
R1	1,73	0,14	1,13	0,08	141,67	24,80
R2	1,68	0,10	1,08	0,10	154,67	28,56

Per tutti i parametri misurati non vi sono differenze statisticamente significative tra le medie delle varie tesi, sebbene sia comunque presente una variabilità residua, riscontrabile principalmente nel peso fresco della pianta prima del trapianto, dovuta a fattori legati alle condizioni di crescita in vivaio, come lo sviluppo del fittone, che è stato possibile correggere solo parzialmente con la potatura radicale eseguita in fase di trapianto. Comunque, la scelta drastica di asportare per intero la parte vegetativa e una porzione delle radici, ha permesso di rendere omogenee le piante e di forzare l'emissione di nuova vegetazione e nuove radici. Inoltre, la suddivisione dell'apparato radicale nelle due porzioni del vaso, ha reso possibile la valutazione degli effetti dei vari principi attivi sulla crescita delle radici di ogni singola pianta, riducendo così le conseguenze della variabilità residua osservata.

La programmazione dell'irrigazione è stata effettuata in modo da garantire alla pianta il costante rifornimento idrico. Nel primo periodo, per favorire lo sviluppo radicale, le irrigazioni della durata di 1,5 h, corrispondenti a 3,5 l per pianta, sono avvenute con cadenza giornaliera, dal trapianto (21/06/2017) e fino agli inizi dicembre dello stesso anno. Nel 2018 l'irrigazione è iniziata a maggio e si è protratta fino a settembre con la somministrazione di un volume irriguo pari a 2,3 l/pianta, corrispondente ad adacquamenti di un'ora, mentre nel 2019, in relazione alle differenti condizioni climatiche, gli adacquamenti sono stati anticipati a marzo con frequenza iniziale di un'ora a settimana, successivamente incrementata a seconda delle necessità della coltura, fino a raggiungere la frequenza giornaliera da luglio e fino al termine dell'esperimento (settembre 2019). Le irrigazioni sono state sospese durante il periodo invernale di ogni anno poiché, le ridotte richieste traspirative della pianta e gli apporti meteorici sono risultati sufficienti.

Il monitoraggio delle radici, effettuato utilizzando il minirizotrone messo a punto per lo scopo, ha permesso di valutare qualitativamente gli effetti dei vari principi attivi anti-radice sullo sviluppo delle radici nell'intorno del gocciolatore. Inoltre, grazie ai rilievi regolari durante il periodo di indagine è stato possibile monitorare lo stato di attività delle radici nonché l'evoluzione delle stesse (attività, senescenza e decomposizione).

Le immagini rilevate nella posizione corrispondente all'inquadratura verso il basso hanno presentato alcuni problemi dovuti al distacco del substrato dal tubo di ispezione, oltre che da fenomeni di condensa e, pertanto, non sono state utilizzate.

La figura 4.1.1 riporta, a titolo di esempio, alcune delle immagini acquisite durante i rilievi nella la tesi di controllo in assenza di principio attivo e nelle tesi nelle quali l'erogatore conteneva il principio attivo anti-radice (Cu, CY1 e R1), effettuati nella posizione Nord (verso l'alto), nella parte del vaso nella quale era installato il gocciolatore. La figura presenta una successione temporale dell'evoluzione delle radici, dall'emissione delle prime radici visibili dopo il trapianto e fino all'ultimo rilievo eseguito al termine del triennio di prova. Dalle immagini è stato possibile identificare le varie fasi dello sviluppo delle radici; queste si presentano inizialmente con colori chiari perché composte da tessuti giovani in piena attività; con il passare del tempo la parte esterna suberifica, acquisendo una colorazione più scura tendente al giallo ambra; alla fine della sua funzione la radice perde di vitalità e rimangono le

parti esterne in marrone scuro che, col tempo, vengono degradate e pertanto non risultano più visibili. Da un'analisi complessiva delle immagini acquisite, l'inizio dello sviluppo radicale dopo il trapianto (giugno 2017) è stato riscontrato alla fine di agosto, compatibile con le tempistiche di ripresa vegetativa dopo l'intervento drastico di potatura. Negli anni successivi, la ripresa dell'attività radicale e vegetativa è avvenuta nel periodo di aprile-maggio, coincidente con l'incremento delle temperature e della richiesta traspirativa dell'atmosfera, mentre l'arresto dello sviluppo radicale si è verificato intorno alla fine di ottobre. I vari trattamenti non hanno influenzato in modo sostanziale le dinamiche dell'attività radicale, che sono state governate dalle condizioni climatiche del sito.

Confrontando le immagini ottenute nelle due sezioni del vaso (C e A-Rt-Ag) è possibile riscontrare una riduzione del quantitativo di radici presenti nell'intorno del gocciolatore con principi attivi per le tesi CY1, CY2 e R2, mentre per le restanti tesi (Controllo, Cu e R1) non sono apprezzabili particolari differenze. Confrontando le immagini rilevate all'interno della singola metà del vaso, lo sviluppo delle radici ha avuto un comportamento differente ha seconda del lato considerato. Nella parte in cui è presente il gocciolatore senza principio attivo (C) il maggior numero di radici è stato rilevato nelle immagini prossime al punto di erogazione. Nella parte con il gocciolatore con A-Rt-Ag, è presente il fenomeno opposto, maggiori radici nella parte più lontana del gocciolatore per le tesi CY1, CY2 e R2, mentre per le restanti tesi non è possibile apprezzare alcuna differenza.

Il monitoraggio attraverso il minirizotrone ha permesso di valutare il comportamento radicale nell'intorno del gocciolatore, seppur in modo qualitativo, identificando quelle tesi che influenzano la crescita delle radici nell'intorno del gocciolatore. Le tesi più efficaci nell'impedire o rallentare la crescita delle radici nei pressi dei gocciolatori sono quelle con principi attivi allelopatici (cianammide) o erbicidi come il Preventol (R2). Differentemente, come era possibile supporre la tesi di Controllo e Cu che basano i loro sistemi di protezione su effetti fisici non influenzano la crescita delle radici nell'intorno del gocciolatore. Per il Controllo la presenza di barriere fisiche interne, induce la radice a svilupparsi senza occludere le sezioni di passaggio, mentre per il Cu l'azione inibitoria dello sviluppo della radice avviene a seguito del contatto della radice con la parete interna del gocciolatore intrisa di particelle di rame.

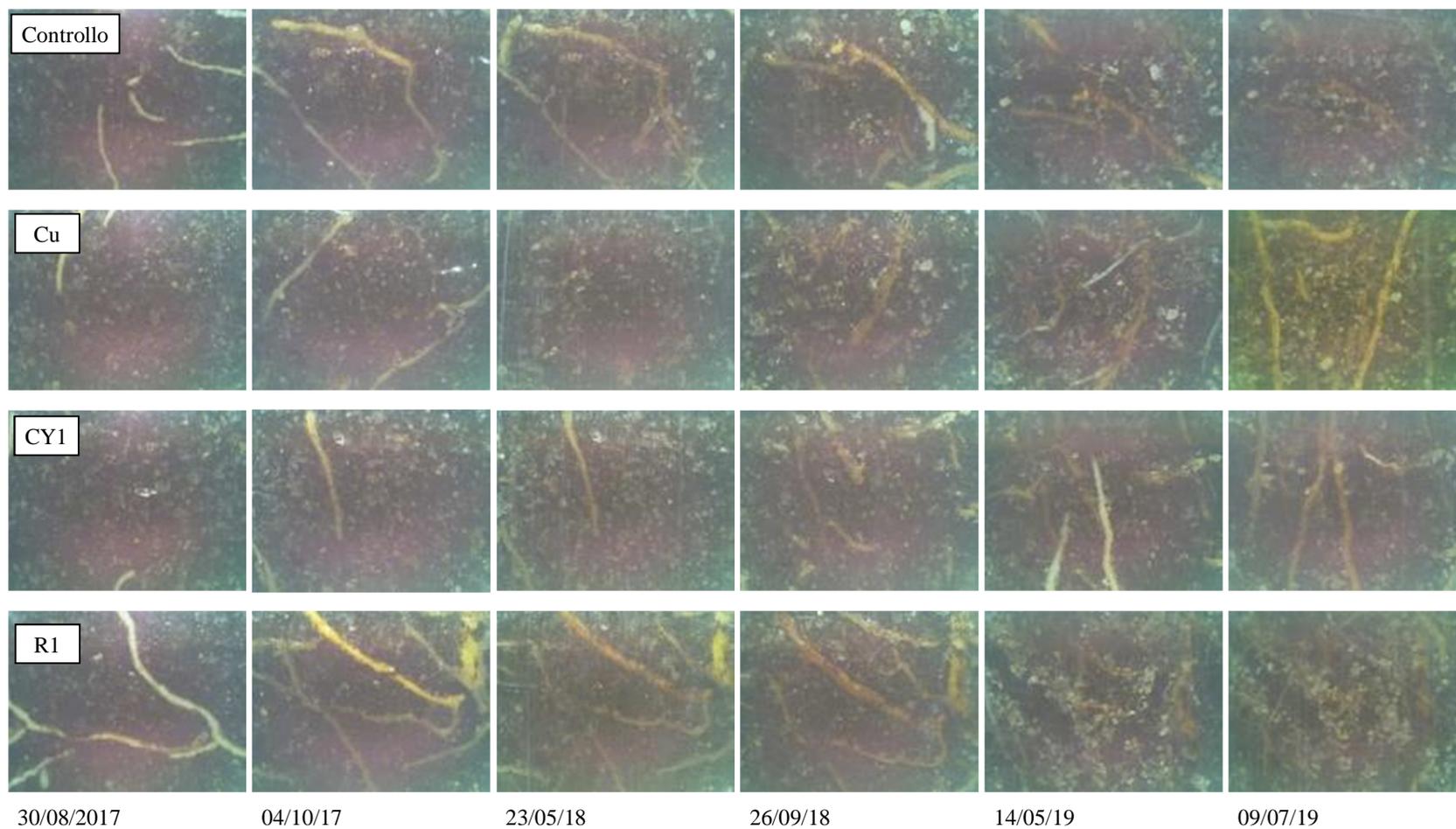


Figura 4.1.1. Immagini rilevate con minirizotrone durante il triennio di indagine. Sono riportate per le tesi Controllo, Cu, CY1, R1, le immagini rilevate alle date indicate nella posizione Nord della parte del vaso contenente i gocciolatori di controllo e quelli contenenti il principio attivo anti-radice (Cu, CY1 ed R1).

I dati relativi del rilievo distruttivo effettuato sulle piante dopo due anni di crescita in vaso sono riportati nella tabella 4.1.2 che mostra le medie e le deviazioni standard del peso secco della nuova crescita (NC) e del totale della pianta (P). Il primo ottenuto sommando il peso di germogli, foglie e radici assorbenti, ed il secondo sommando alle precedenti il peso secco di rami, fusto, fittone e radici secondarie. Inoltre sono indicati i rapporti tra la nuova crescita e il peso secco della pianta (NC/P), e tra foglie e radici assorbenti (F/R).

Tabella 4.1.2. Dati vegetativi medi e relative deviazioni standard dopo il periodo di sperimentazione. Per ogni gruppo di piante trattate con differente principio attivo (A-Rt-Ag) sono indicati il peso secco totale della nuova crescita (NC), il peso secco totale della pianta (P), e le medie dei rapporti NC/P e tra foglie(F) e radici assorbenti (R_T) F/R_T . Le medie con le stesse lettere non sono significativamente differenti per ($P < 0,05$).

A-Rt-Ag	NC [g]			P [g]			NC/P			F/ R_T		
	μ	σ		μ	σ		μ	σ		μ	σ	
Controllo	51,38	4,90	b	158,29	19,50	b	0,33	0,07	a	0,44	0,12	a
Cu	65,31	10,33	ab	212,82	28,81	a	0,31	0,04	a	0,48	0,13	a
CY1	62,07	13,09	ab	180,54	42,75	ab	0,35	0,08	a	0,50	0,14	a
CY2	67,62	9,04	ab	192,41	17,36	ab	0,35	0,02	a	0,52	0,12	a
R1	57,70	9,62	ab	172,88	19,43	ab	0,34	0,07	a	0,56	0,19	a
R2	78,17	20,57	a	199,10	18,03	ab	0,39	0,09	a	0,51	0,14	a

Per quanto riguarda lo sviluppo delle piante è stata osservata un'alta variabilità della risposta vegetativa, all'interno di tutti i trattamenti osservati, in termini di sviluppo dei germogli e crescita del sistema radicale. Sono state riscontrate differenze statisticamente significative tra le tesi, esclusivamente nel peso secco della nuova crescita vegetativa e nel peso secco totale della pianta. Queste sono imputabili al maggior numero di succhioni, sviluppati in alcune piante, che ne hanno determinato l'incremento del peso medio nelle tesi Cu e R2.

Per normalizzare la variabilità insita nelle tesi è stato calcolato il rapporto NC/P che indica la percentuale della vegetazione cresciuta durante l'ultimo anno di sviluppo rispetto al peso totale della pianta. Come è possibile osservare non vi sono differenze statisticamente significative tra le medie dei vari trattamenti. La formazione di nuove strutture vegetative e radicali, quindi non è stata influenzata, nel complesso, dalla presenza dei vari principi attivi, se non limitatamente all'intorno del gocciolatore così come emerso nelle analisi effettuate con il minirizotrone. Il rapporto tra foglie e radici (F/R), così come il precedente, non presenta differenze significative tra le medie delle tesi, ciò conferma che gli effetti del principio attivo anti-intrusione sulla

crescita delle piante sono piuttosto limitati o assenti. Infatti questo rapporto è interpretabile come una misura della relazione tra foglie e radici e la loro mutualistica dipendenza, di conseguenza questo valore può essere assunto come un equilibrio esistente a seguito della competizione tra le foglie e le radici per carboidrati, acqua e elementi minerali. Quindi il comportamento analogo per tutte le tesi, lascia supporre che i principi attivi non hanno alterato questo equilibrio, sfavorendo ad esempio lo sviluppo delle radici rispetto alla formazione delle foglie a parità delle altre condizioni presenti in campo.

Per confermare la limitata influenza dei vari principi attivi anti-radice, è stato confrontato, per ogni singola pianta, nelle vari tesi, il peso secco delle radici presenti in entrambe le porzioni del vaso in assenza o in presenza di principio attivo anti-radice. La tabella 4.1.3 mostra le medie e le deviazioni standard del peso secco delle componenti assorbenti e secondarie dell'apparato radicale e il loro totale, rilevate nella metà del vaso con il gocciolatore di controllo (C) e nella metà con quello contenente l'A-Rt-Ag. La media e le deviazioni standard dei rapporti tra i dati ottenuti nelle due metà e altresì indicato (A-Rt-Ag/C).

Tabella 4.1.3. Medie e deviazioni standard associate al peso secco delle radici cresciute nelle due porzione dei vasi; la prima delle quali contenente gocciolatori senza principio attivo (C) e la seconda con gocciolatori con il principio attivo anti-radice (A-Rt-Ag). Le radici sono state separate in assorbenti con diametro < 2 mm (R_{AS}), secondarie con diametro > 2 mm (R_{SE}) e totali (R_T). La media e le deviazioni standard dei rapporti tra i dati dei ottenuti nelle due porzione dei contenitori e altresì indicato (A-Rt-Ag/C).

Trattamento	C						A-Rt-Ag						A-Rt-Ag/C					
	R_{AS} [g]		R_{SE} [g]		R_T [g]		R_{AS} [g]		R_{SE} [g]		R_T [g]		R_{AS} [g]		R_{SE} [g]		R_T [g]	
	μ	σ	μ	σ	M	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
Controllo *	10,8	2,0	6,4	1,2	17,2	3,0	8,2	2,7	6,8	2,1	15,0	4,0	0,8	0,2	1,1	0,4	0,9	0,2
Cu	13,0	4,1	8,7	3,6	21,7	7,4	9,7	3,4	8,7	3,2	18,4	6,1	0,7	0,1	1,1	0,4	0,9	0,2
CY1	9,2	2,2	5,8	1,8	15,0	3,6	8,8	3,5	8,0	3,0	16,7	6,3	0,9	0,2	1,4	0,4	1,1	0,2
CY2	10,6	2,6	8,7	4,2	19,3	6,7	9,4	2,9	7,8	2,6	17,1	5,3	0,9	0,2	1,0	0,2	0,9	0,2
R1	9,9	2,8	7,8	4,4	17,7	6,9	7,5	2,8	7,5	2,7	14,9	4,8	0,8	0,3	1,2	0,8	0,9	0,4
R2	11,3	3,3	8,9	1,1	20,3	3,5	10,3	2,5	9,4	2,0	19,7	3,6	1,0	0,3	1,1	0,3	1,0	0,3

* Il trattamento di controllo, contiene in entrambi i lati del contenitore i gocciolatori senza principio attivo.

Anche in questo caso il confronto tra le tesi per ogni singolo parametro non ha determinato differenze statisticamente significative. I valori maggiori del peso delle radici assorbenti, che rappresentano la componente attiva della radice più suscettibile all'effetto dei vari formulati, sono stati misurati nella porzione di vaso senza principi attivi. Come è possibile notare infatti i valori

del rapporto A-Rt-Ag/C sono inferiori ad 1 per tutte le tesi eccetto R2. La riduzione verificatasi anche nella tesi di controllo ci porta ad escludere l'effetto dei A-Rt-Ag testati sulla crescita ed ad attribuire queste differenze riscontrate ad altri fattori esterni non tenuti in considerazione durante i rilievi sperimentali.

In parallelo alle misure sulla vegetazione è stata svolta un'indagine per valutare l'efficacia nella protezione dei gocciolatori da parte dei principi attivi anti-radice e l'effetto dell'utilizzo degli stessi dopo due anni di funzionamento in vaso. La tabella 4.1.4 riporta le medie, le deviazioni standard e i coefficienti di variabilità delle portate, misurate in laboratorio alla pressione di 150 kPa all'inizio e alla fine dei due anni di sperimentazione.

Tabella 4.1.4. Medie, deviazioni standard e coefficienti di variabilità delle portate, alla pressione di 150 kPa, per i diversi A-Rt-Ag all'inizio (Q_{ini}) ed alla fine (Q_{fin}) delle prove in vaso. Le riduzioni percentuali di portata (ΔQ) sono altresì indicate.

A-Rt-Ag	Q_{ini} [l/h]			Q_{fin} [l/h]			ΔQ
	μ	σ	CV_T	μ	σ	CV	
Controllo	2,02	0,06	3,0%	1,80	0,29	16,3%	-10,6%
CY1	2,57	0,06	2,5%	2,21	0,78	35,1%	-13,9%
CY2	2,60	0,07	2,6%	2,45	0,25	10,3%	-5,8%
Cu	2,21	0,09	3,9%	2,16	0,10	4,9%	-2,4%
R1	2,37	0,11	4,6%	2,26	0,10	4,6%	-4,6%
R2	2,37	0,11	4,6%	2,25	0,16	7,0%	-5,2%

Per quanto riguarda i gocciolatori prima del test, la minore portata del Controllo è dovuta al modello Multibar F, con caratteristiche costruttive e di erogazione differenti dal modello Multibar C. Per le restanti tesi, in cui il modello di gocciolatore è il medesimo (Multibar C), il processo tecnologico di inserimento dei vari principi attivi anti-radice ha determinato una variazione nelle portate erogate tra 2,21 e 2,60 l/h e del CV_T associato, rimanendo sempre al di sotto del 5 %.

Dopo due anni di utilizzo dell'impianto i gocciolatori hanno manifestato una generale riduzione della portata a seguito dei fenomeni congiunti dell'invecchiamento dei gocciolatori e dell'intrusione radicale, che va da -2,4% per la tesi Cu a valori superiori al 10% per le tesi Controllo e CY1. Per tutti gli altri gocciolatori si è verificata una riduzione media della portata contenuta (al di sotto del 6%), con modesti incrementi del CV. I valori maggiori di CV, superiori al 10%, sono stati misurati nelle tesi CY2, Controllo e CY1. In quest'ultimo caso, la completa

perdita di funzionalità di un gocciolatore a seguito dell'occlusione da parte delle radici, ha generato un aumento del CV fino al valore di 35,1%.

Le figure 4.1.2 e 4.1.3 riportano le relazioni Q(P) associate ai gocciolatori nuovi ed al termine della sperimentazione, la presenza di radici all'interno dei percorsi idraulici del gocciolatore è indicata con una stella. Il confronto con i gocciolatori nuovi (linea continua) evidenzia che le relazioni Q(P) ottenute per i gocciolatori contenenti il principio attivo, dopo due anni di utilizzo, sono abbastanza diversificate. L'intrusione delle radici ha influenzato, in alcuni casi, le relazioni Q(P), come è evidente nelle tesi CY1e CY2 con ripercussione sulle portate erogate; per alcuni gocciolatori invece (Cu e R2), nonostante si sia riscontrata la presenza di radici, le variazioni delle portate sono risultate assenti o del tutto trascurabili. Sono inoltre evidenti, in C_[R1] e nella tesi R2, fenomeni di incremento delle portate erogate non dipendenti dall'intrusione radicale. Queste variazioni possono essere ricondotte a fenomeni legati all'invecchiamento dei gocciolatori come il cambio delle proprietà elastiche della membrana del gocciolatore.

In generale, è stato osservato che, nonostante la presenza delle radici, i gocciolatori non hanno perso la loro capacità autocompensante né perso la loro funzionalità, seppur riducendo le prestazioni in termini di incremento della variabilità delle portate erogate. Solamente in due casi sull'intero set di gocciolatori osservati le radici hanno provocato un'occlusione severa con riduzioni drastiche delle portate erogate.

Per valutare le cause delle differenti relazioni Q(P) ottenute per i diversi modelli di gocciolatore, è stata effettuata un'ispezione visiva dell'interno del gocciolatore. La figura 4.1.4 riporta, per i vari principi attivi, un campione delle immagini ottenute del foro di erogazione prima di sottoporre i gocciolatori alle prove di caratterizzazione idraulica, e le immagini dell'interno del gocciolatore dopo la rimozione del PE. Dalla crescita delle radici all'interno del gocciolatore, è risultato chiaramente che i casi di intrusione che determinano la riduzione della portata non sono stati necessariamente quelli con la maggiore crescita radicale. L'occlusione totale si è infatti verificata solo quando la radice ha occluso il foro di passaggio al termine del labirinto (figura 4.1.4, b-e). Al contrario, le immagini c, d, f e g mostrano casi di intrusione radicale che non hanno causato la totale occlusione dell'erogatore o significative riduzioni delle portate. Nei casi "a" e "h" non vi è la presenza delle radici all'interno del gocciolatore per effetto di fattori casuali (a) o per effetto dei principi attivi anti radici (r).

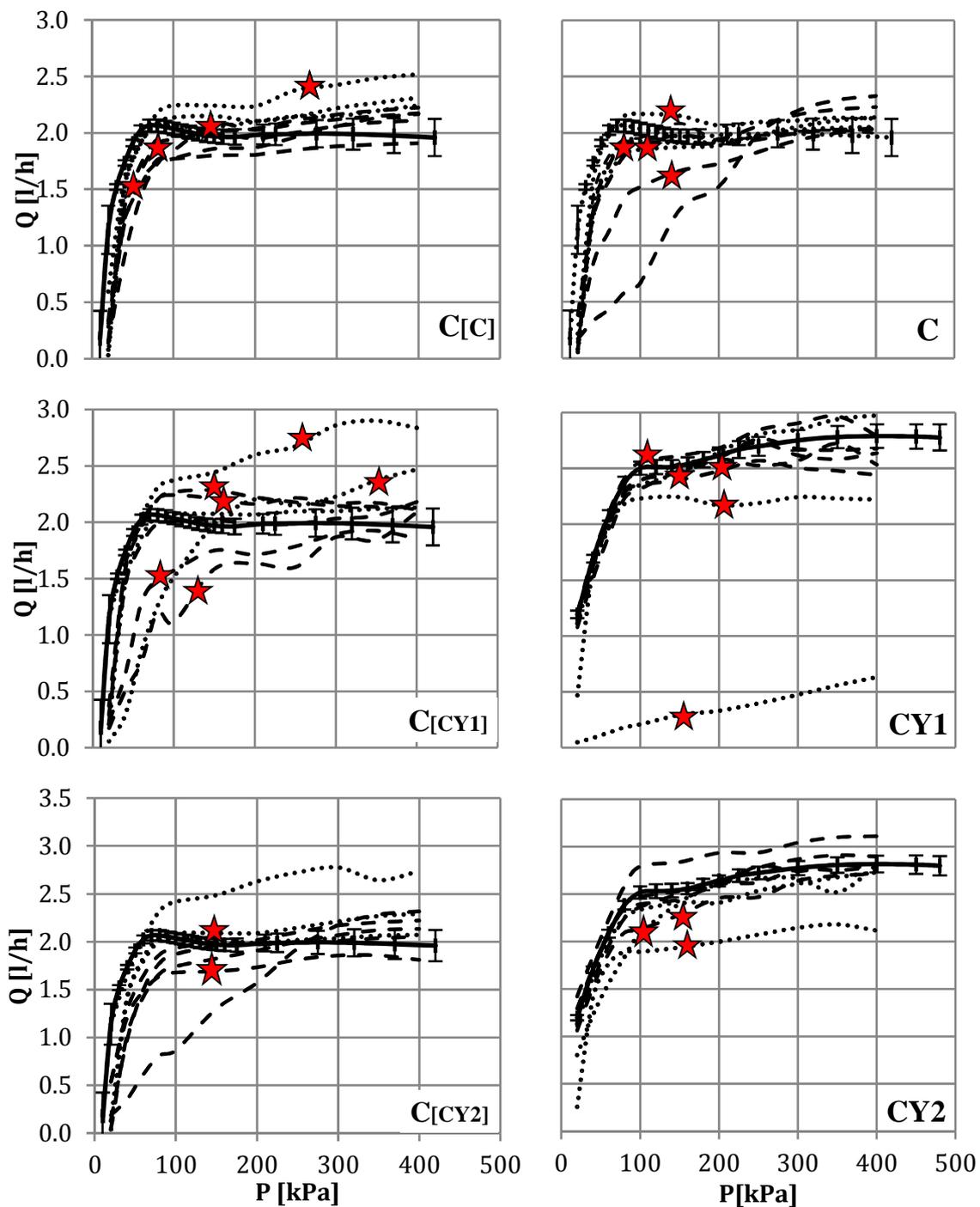


Figura 4.1.2. Confronto tra le curve $Q(P)$ ottenute per i gocciolatori Controllo, CY1 e CY2 prima e dopo il test. La linea continua rappresenta il valore medio dei gocciolatori prima del test con la relativa deviazione standard associata; le stelle indicano i casi in cui è stata rilevata l'intrusione radicale all'interno gocciolatore

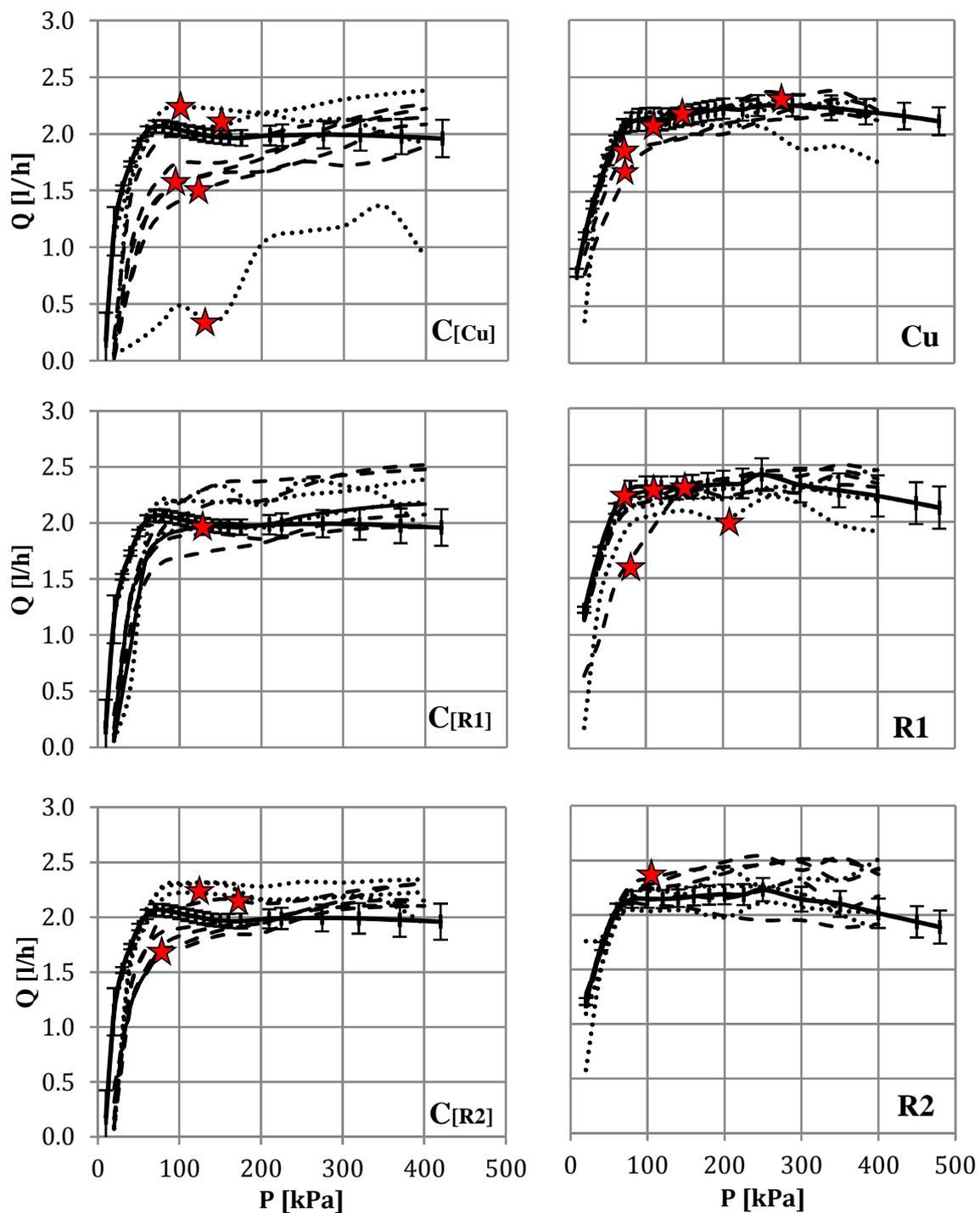


Figura 4.1.3. Confronto tra le curve $Q(P)$ ottenute per i gocciolatori CU, R1 e R2 prima e dopo il test. La linea continua rappresenta il valore medio dei gocciolatori prima del test con la relativa deviazione standard associata; le stelle indicano i casi in cui è stata rilevata l'intrusione radicale all'interno gocciolatore

A questo proposito, la progettazione del labirinto interno dei gocciolatori, oltre alla presenza di principi attivi anti-radice, assume un ruolo chiave ai fini della suscettibilità all'occlusione radicale. Questo è il caso, ad esempio, delle immagini “c”, corrispondenti al gocciolatore di controllo, per il quale, lo sviluppo delle radici all'interno della camera presente alla fine del percorso idraulico non ha determinato l'intasamento completo e non ha influenzato le portate corrispondenti alla pressione nominale. Similmente, per i gocciolatori contenenti i principi attivi anti-radice, le camere prima del foro di uscita permettono la crescita della radice senza compromettere le portate, inoltre la presenza di due fori di gocciolamento, ha assicurato il funzionamento senza una differenza apprezzabile nelle portate, anche quando uno dei due fori risulta bloccato dalla presenza della radice (figura 4.1.4 g). La presenza di radici è stata rilevata, seppur con intensità differenti, in tutti i trattamenti. La tabella 4.1.5 riporta per ogni trattamento i dati ottenuti dalla valutazione della presenza e dalla misura della lunghezza delle radici all'interno del gocciolatore.

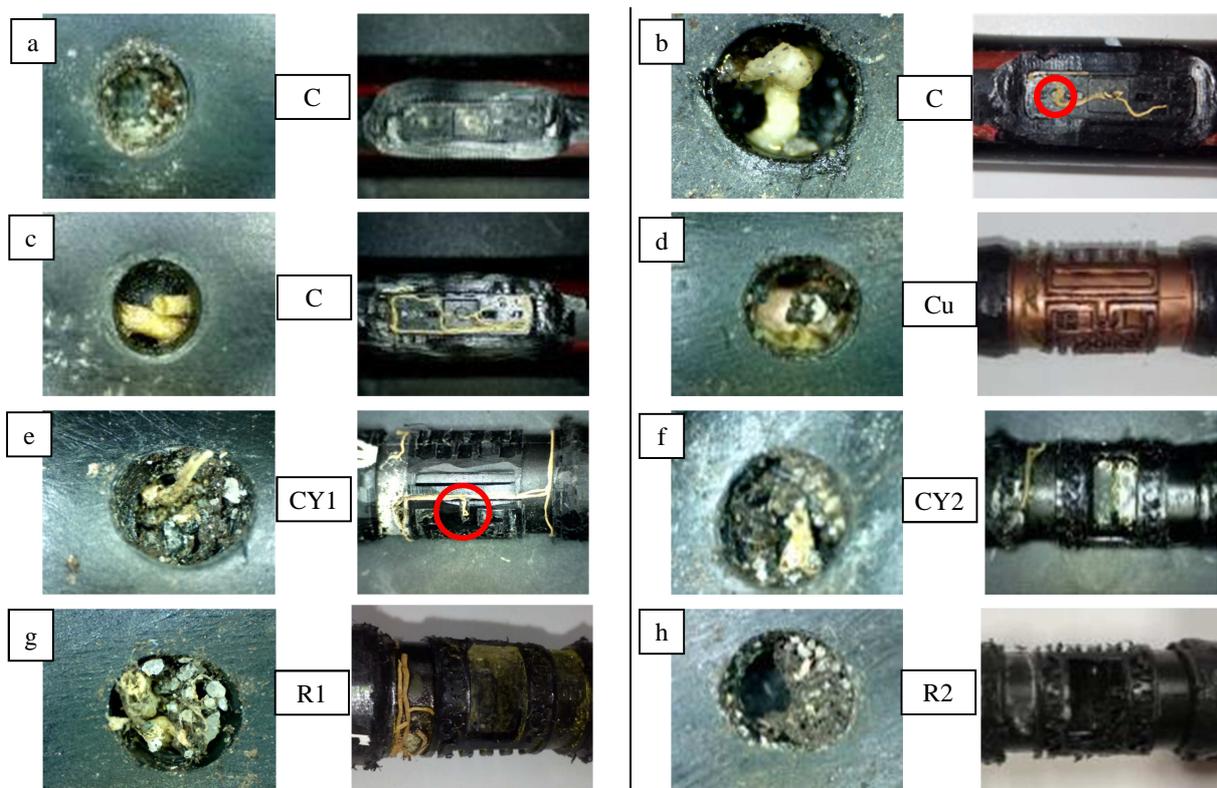


Figura 4.1.4. Per ogni modello di gocciolatore sono mostrate un immagine del foro di erogazione prima della prova di caratterizzazione idraulica e una foto dopo l'esposizione della parte interna del gocciolatore. I cerchi rossi indicano i punti del gocciolatore in cui si sono verificate occlusioni severe.

Per ogni singolo trattamento sono riportate le percentuali dei gocciolatori con presenza di radici sul totale, come pure i totali, le medie e le deviazioni standard della lunghezza delle radici cresciute all'interno del gocciolatore. Per ogni trattamento i dati sono riportati tenendo in considerazione in modo separato i gocciolatori di controllo (C) posizionati in una metà del vaso e quelli con principio attivo anti-radice (A-Rt-Ag) nell'altra metà.

La tesi di controllo, in cui in entrambe le parti del vaso sono installati i medesimi gocciolatori senza principi attivi, presenta nella metà del campione fenomeni di intrusione radicale per entrambe le parti del vaso. Quando si considera la presenza delle radici nei gocciolatori di controllo (C) presenti nei vari trattamenti il comportamento risulta variabile da un minimo del 13% (R1) ad un massimo del 75% (CY1). Il principio attivo nelle tesi R2 e CY2 ha limitato l'intrusione radicale al 12,5% e 37,5% degli erogatori esaminati, contrariamente agli altri principi attivi per i quali è stata rinvenuta la presenza di radici nel 63% dei gocciolatori. La crescita delle radici all'interno dei gocciolatori è risultata piuttosto variabile con i valori massimi della crescita tot riscontrati in Cu (40,4 cm) in cui l'effetto del principio attivo si basa sull'inibizione della crescita per il contatto con le pareti interne del gocciolatore in cui le particelle di rame sono inserite.

Tabella 4.1.5. Percentuale di gocciolatori con presenza di radici sul totale del campione ($R_{\%}$), lunghezze totali, medie e deviazioni standard delle radici cresciute all'interno dei gocciolatori senza principio attivo (C) e con il principio attivo anti-radice (A-Rt-Ag).

Trattamento	C				A-Rt-Ag			
	$R_{\%}$ [%]	Lunghezza [cm]			$R_{\%}$ [%]	Lunghezza [cm]		
		Tot	μ	σ		Tot	μ	σ
Controllo *	50	8,0	2,0	1,9	50	12,4	3,1	2,6
Cu	63	16,9	3,4	1,7	63	40,4	8,1	10,5
CY1	75	36,3	6,1	5,3	63	29,3	5,9	7,5
CY2	25	20,1	10,1	4,6	38	13,6	4,5	5,8
R1	13	0,5	0,5		63	30,6	6,1	5,0
R2	38	7,7	2,6	2,2	13	1,2	1,2	

* Il trattamento di controllo, contiene in entrambi i lati del contenitore i gocciolatori senza principio attivo

Per i gocciolatori di controllo, C, i dati presentano, una forte variabilità sia in termini di lunghezza totale che media delle radici. Nel trattamento CY2, che presenta il doppio della

concentrazione di principio attivo anti-radice di CY1, il numero di campioni con la presenza delle radici e la relativa lunghezza totale sono risultati circa la metà del campione CY1, ciò porta a supporre un effetto legato alla concentrazione del principio attivo all'interno del gocciolatore. Contrariamente a quello che ci si poteva aspettare il Trifluralin (R1) che presenta, utilizzato come erbicida, una efficacia comprovata non ha avuto un effetto protettivo sufficiente dall'intrusione radicale mostrando una risposta simile a CY1. In accordo con quello osservato dalle misure effettuate con il minirizotrone i principi attivi più performanti sono la cianammide con concentrazione di 2,5% (CY1) e il Preventol (R2) che ha mostrato la migliore protezione dall'intrusione radicale.

Le prove in vaso, forzando la crescita delle radici in un ambiente contenuto, hanno permesso di valutare simultaneamente l'efficacia dei vari principi attivi anti-radice nella protezione del gocciolatore dall'intrusione radicale e i possibili effetti degli stessi sullo sviluppo della pianta.

Gli effetti sulla crescita della pianta sono risultati piuttosto limitati o assenti, quindi i gocciolatori con le formulazioni testate possono essere utilizzati in pieno campo con limitati rischi per la coltivazione di agrumi su portinnesto di *citrangé* 'Carrizzo'.

Le condizioni forzate della crescita in vaso hanno provocato l'intrusione radicale anche nel limitato periodo di studio, con effetti variabili per i vari principi attivi. Dopo due anni di esercizio nonostante la presenza di radici all'interno del gocciolatore, è stata mantenuta una certa funzionalità nell'erogazione, quindi è possibile allungare la vita utile dell'impianto con la programmazione di interventi annuali di prevenzione dell'ostruzione tramite la somministrazione di forti agenti ossidanti atti ad eliminare le eventuali radici cresciute nel gocciolatore, in modo da ripristinare le condizioni iniziali di erogazione. Questo studio ha permesso inoltre di valutare eventuali modifiche fisiche dei gocciolatori per migliorare il funzionamento anche in presenza di radice.

4.2 Caratterizzazione dell'area e monitoraggio dello stato idrico del sistema SPA

I suoli dell'area di studio sono stati inizialmente caratterizzati attraverso la determinazione delle caratteristiche tessiturali dello strato superficiale (0-20 cm), anche al fine di valutarne l'eventuale variabilità spaziale delle componenti di argilla ($d < 0,02$ mm), limo ($d < 0,05$ mm) e sabbia ($d < 0,2$ mm). La figura 4.2.1 mostra le curve granulometriche relative ai diversi punti di campionamento, mentre invece la tabella 4.2.1 riporta, per ciascun punto di prelievo, le coordinate GPS riferite al sistema WGS84, la percentuale in peso dello scheletro (P), le percentuali di argilla (A), limo (L), sabbia (S) e la relativa classificazione USDA.

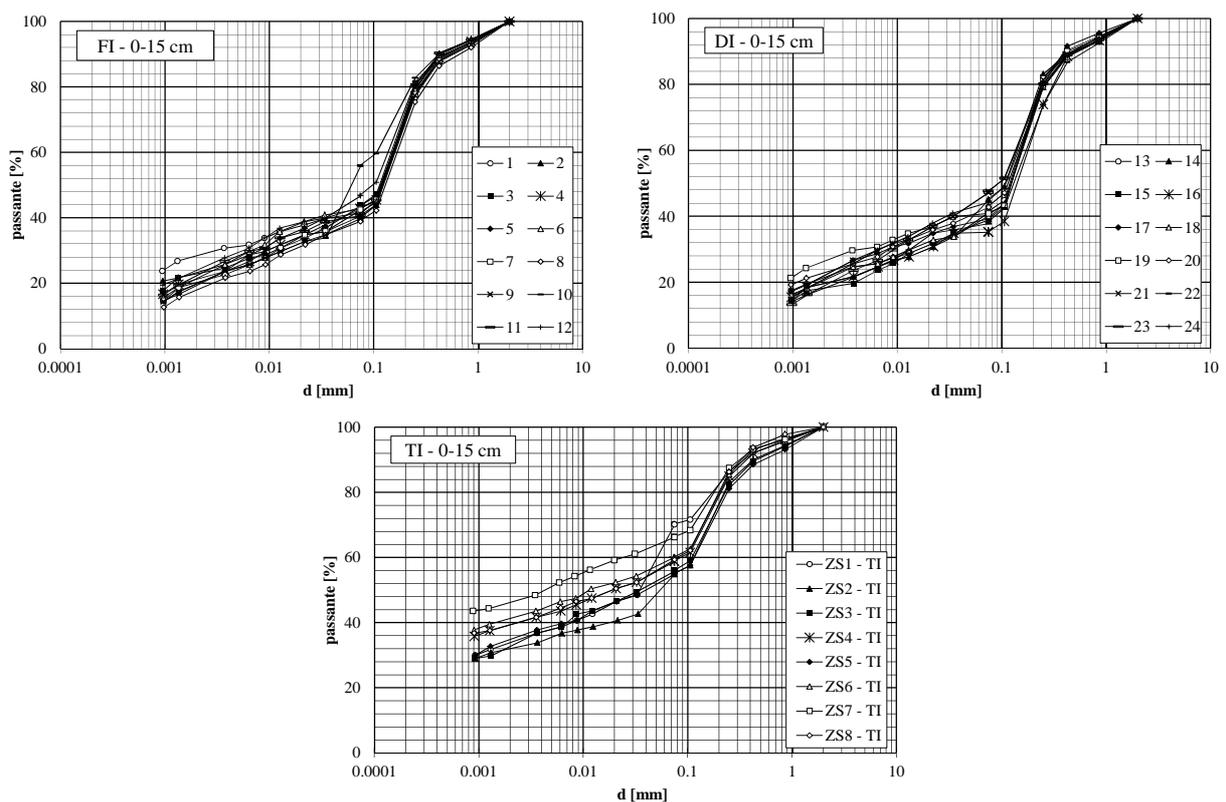


Figura 4.2.1. Curve granulometriche dei campioni prelevati alla profondità di 0-20 cm nelle tesi FI, DI e TI.

Tabella 4.2.1 Coordinate GPS dei punti di campionamento dello strato superficiale (0-20 cm) e percentuale in peso dello scheletro con diametro >2 mm (P), del contenuto di argilla (A), limo (L) e sabbia (S). La classe tessiturale, secondo la classificazione USDA è altresì riportata.

Punto	Coordinate WGS84		P [%]	A [%]	L [%]	S [%]	Classificazione USDA
	E	N					
1	361364	4216008		28,4	12,3	59,3	Sandy clay loam
2	361353	4216005		23,2	14,8	62,0	Sandy clay loam
3	361343	4216000		22,8	17,2	60,0	Sandy clay loam
4	361334	4216007		21,2	19,0	59,9	Sandy clay loam
5	361336	4216017		19,3	22,2	58,5	Sandy loam
6	361338	4216027		21,3	20,4	58,2	Sandy clay loam
7	361332	4216033		20,2	18,8	61,0	Sandy clay loam
8	361321	4216030		17,9	18,9	63,3	Sandy loam
9	361312	4216025		19,8	17,4	62,8	Sandy loam
10	361303	4216032		19,8	24,4	55,8	Sandy loam
11	361306	4216042		22,2	17,5	60,3	Sandy clay loam
12	361308	4216051		23,9	19,3	56,8	Sandy clay loam
13	361374	4216023		21,5	15,9	62,7	Sandy clay loam
14	361376	4216034		19,7	19,4	60,9	Sandy loam
15	361377	4216045		18,3	18,6	63,2	Sandy loam
16	361370	4216051		19,7	15,3	65,0	Sandy loam
17	361360	4216046		22,0	16,0	62,0	Sandy clay loam
18	361349	4216043		20,6	16,2	63,2	Sandy clay loam
19	361343	4216047		26,4	14,0	59,6	Sandy clay loam
20	361345	4216058		22,9	17,3	59,8	Sandy clay loam
21	361346	4216068		22,0	21,4	56,6	Sandy clay loam
22	361338	4216074		18,2	18,6	63,2	Sandy loam
23	361328	4216070		19,0	24,5	56,5	Sandy loam
24	361317	4216064		21,0	21,6	57,4	Sandy clay loam
25	361325	4216024	30,1	18,2	19,3	62,5	Sandy loam
26	361350	4216057	25,6	21,9	15,8	62,3	Sandy clay loam
27	361348	4216003	17,7	16,6	18,4	65,0	Sandy loam
28	361332	4216016	24,3	19,8	23,5	56,7	Sandy loam
29	361323	4216036	29,8	19,9	19,7	60,4	Sandy loam
30	361300	4216047	23,0	32,1	14,9	53,1	Sandy clay loam
31	361380	4216044	47,5	22,9	15,5	61,6	Sandy clay loam
32	361361	4216053	20,8	25,7	16,8	57,5	Sandy clay loam
33	361345	4216065	35,0	25,9	17,6	56,5	Sandy clay loam
34	361322	4216077	44,6	20,9	19,8	59,2	Sandy clay loam
35	361395	4215994	31,7	36,4	15,5	48,2	Sandy clay
36	361342	4215982	46,6	21,6	17,4	61,0	Sandy clay loam
37	361352	4216019	25,7	21,8	16,6	61,6	Sandy clay loam
38	361320	4216043	32,5	18,5	19,5	62,0	Sandy loam
39	361285	4216039	46,4	23,9	16,2	60,0	Sandy clay loam
40	361395	4216049	41,8	24,7	21,4	53,9	Sandy clay loam
41	361362	4216032	23,1	19,8	15,2	65,0	Sandy loam
42	361331	4216056	30,6	20,2	21,1	58,8	Sandy clay loam
43	361326	4216092	46,5	26,3	13,8	59,9	Sandy clay loam
44	361384	4216001	21,4	33,8	25,7	40,5	Clay loam
45	361394	4216013	23,7	32,0	16,7	51,3	Sandy clay loam
46	361403	4216025	24,3	32,6	20,0	47,4	Sandy clay loam
47	361401	4216007	26,2	39,3	16,4	44,4	Clay loam
48	361411	4216019	23,2	34,8	16,9	48,3	Sandy clay loam
49	361400	4215989	33,7	41,3	16,0	42,7	Clay loam
50	361409	4216001	39,7	46,2	17,6	36,2	Clay loam
51	361418	4216012	14,8	39,3	16,6	44,1	Clay loam

La tabella 4.2.2. sintetizza i valori medi, minimi e massimi della percentuale di scheletro e delle frazioni granulometriche riferite a ciascuna tesi irrigua (TI, FI e DI). Come è possibile osservare, le tre diverse tesi irrigue sono contraddistinte da una elevata variabilità delle particelle minerali che compongono il suolo, soprattutto con riferimento alla tesi TI, per la quale sono state riscontrate, nello strato superficiale, percentuali di argilla generalmente più elevate rispetto alle tesi FI e DI.

Tabella 4.2.2. Medie, valori minimi e massimi delle percentuali in peso dello scheletro con diametro >2 mm (P), del contenuto di argilla (A), limo (L) e sabbia (S)

	P			A			L			S		
	[%]			[%]			[%]			[%]		
	μ	Min	max									
TI	26.5	14.8	39.7	37.3	23.9	46.2	17.9	16.0	25.7	44.8	36.2	51.3
FI	30.7	17.7	46.6	21.5	17.9	32.1	18.5	13.8	24.4	60.0	53.9	65.0
DI	35.1	20.8	47.5	21.9	16.6	26.4	17.9	14.0	24.5	60.2	40.5	65.0

La figura 4.2.2 riporta il triangolo tessiturale USDA ed identifica le classi granulometriche entro le quali ricadono i suoli corrispondenti ai punti campionati. L'esame della figura evidenzia che lo strato superficiale di suolo prelevato nelle tesi FI e DI ricade all'interno delle classi sandy-clay-loam e sandy-loam, mentre invece per la tesi TI ricade nelle classi tessiturali sandy-clay-loam, clay-loam e clay.

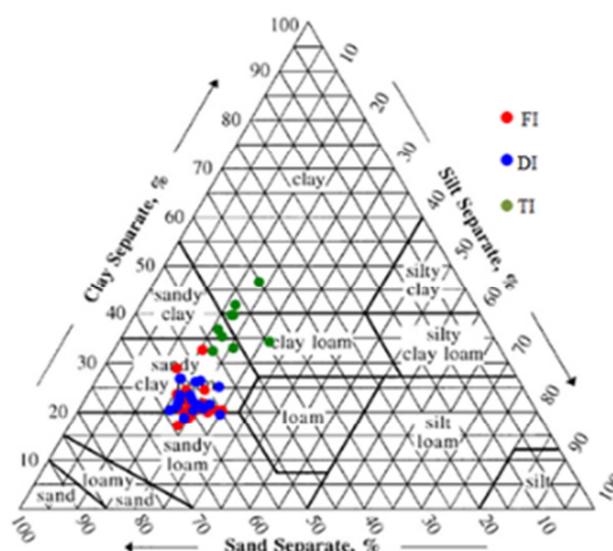


Figura 4.2.2. Triangolo tessiturale USDA. I punti all'interno del grafico identificano la classe tessiturale dei campioni prelevati nello strato superficiale (0-20 cm) delle diverse tesi irrigue.

Le percentuali di argilla, limo e sabbia sono state quindi spazializzate con l'ausilio del software QGIS, utilizzando il metodo dell'inverso delle distanze, in modo da ottenere le relative mappe riferite all'area oggetto di studio, come mostrato in figura 4.2.3.

Come è possibile osservare, la tesi TI si differenzia rispetto alle altre, per i valori generalmente maggiori della componente fine (argilla e limo), mentre invece le tesi FI e DI, pur essendo caratterizzate da una spiccata eterogeneità, mostrano andamenti delle percentuali tessiturali relative allo strato superficiale abbastanza simili tra loro. Nello specifico, la strada interpodereale che separa la tesi TI dalle altre, delimita un'area caratterizzata da più elevate percentuali delle componenti fini (argilla e limo) che, in qualche misura, influiscono sul più rigoglioso sviluppo vegetativo delle piante.

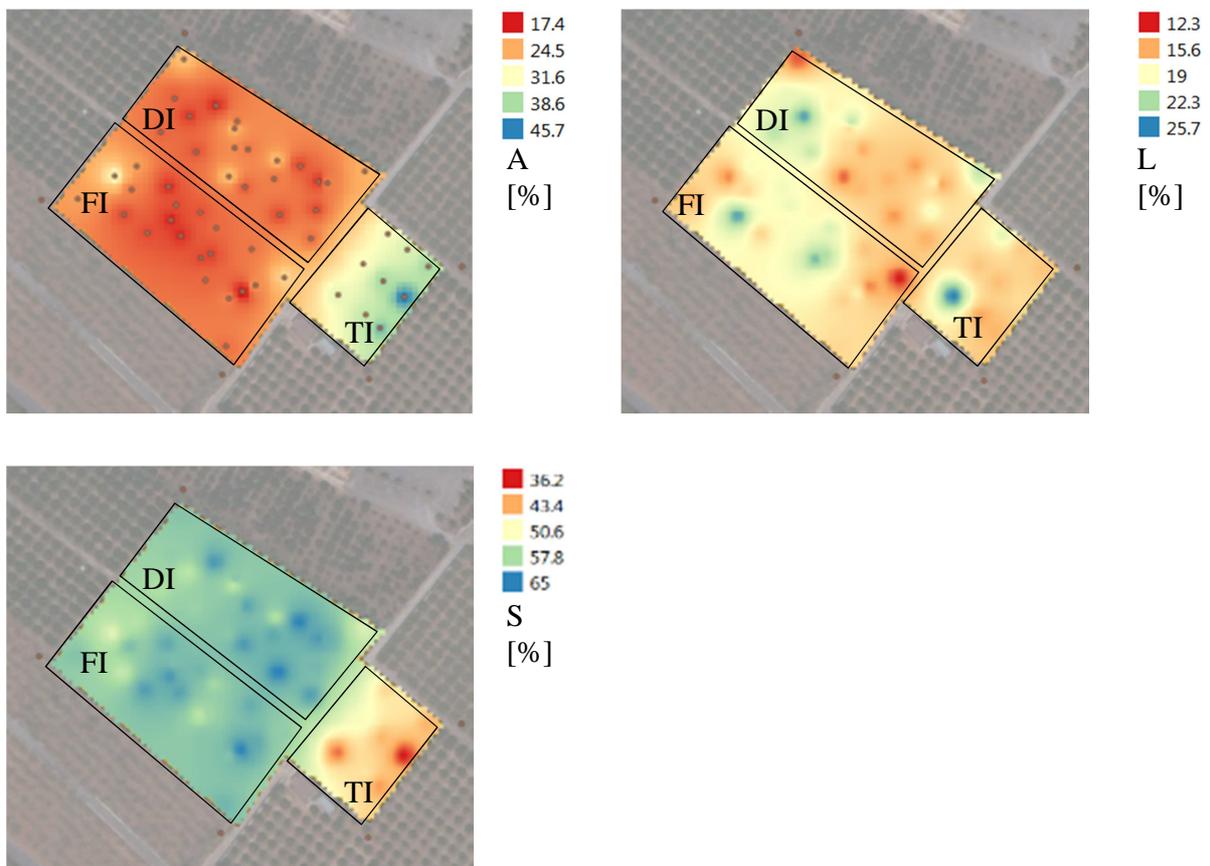


Figura 4.2.3. Distribuzione spaziale delle percentuali di argilla, limo e sabbia sulle tesi TI, FI e DI.

Successivamente, in concomitanza con l'installazione dell'impianto di subirrigazione e del posizionamento dei sensori di misura del contenuto idrico del suolo, in corrispondenza di questi ultimi, sono stati prelevati campioni rimaneggiati a profondità di 0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm e, infine, 60-80 cm. Anche per la tesi TI si è proceduto analogamente, al fine valutare le frazioni granulometriche riferite ai rispettivi profili di suolo. La tabella 4.2.3 riporta le percentuali in peso dello scheletro (Sc), le percentuali di argilla, limo, sabbia e la relativa classificazione USDA, relative alle tesi TI, FI e DI. Come è possibile verificare, la percentuale di scheletro ($d > 2\text{mm}$) presenta una notevole variabilità e valori talvolta molto elevati, come nel caso dei profili DI3 e DI4 (profondità 0-60 cm) e dei profili FI3 ed FI4 (profondità 40-60 cm), nei quali sono risultati sempre superiori al 35%, con un valore massimo pari addirittura al 76,8% (DI4, 40-60 cm). Inoltre, per la quasi totalità dei profili di suolo investigato, le percentuali di argilla risultano crescenti all'aumentare della profondità, con valori nella tesi TI che, per tutte le profondità, sono risultati maggiori rispetto a quelli riscontrati in FI e DI. Di contro, le percentuali di sabbia, variabili approssimativamente tra il 40% ed il 70%, tendono a diminuire con la profondità.

Tabella 4.2.3. Analisi granulometriche dei campioni prelevati nelle tesi TI, FI e DI, a diverse profondità e in prossimità dei sensori "drill & dropTM". Per ciascuna profondità sono indicate la percentuale in peso del campione con diametro > 2 mm (Sc) e delle componenti argilla (A), limo (L) e sabbia (S) espresse secondo la classificazione USDA.

	Sc	A	L	S	Sc	A	L	S	Sc	A	L	S	Sc	A	L	S
	0-20 cm [%]				20-40 cm [%]				40-60 cm [%]				60-80 cm [%]			
TI	31,7	36,4	15,5	48,1	24,6	38,4	15,5	46,1	6,9	54,6	13,0	32,4	1,7	54,0	9,0	37,0
FI1	17,7	16,6	18,4	65,0	41,8	18,9	11,2	69,9	6,9	45,2	12,6	42,2	1,9	52,6	5,8	41,6
FI2	24,3	19,8	23,5	56,7	22,2	23,9	21,7	54,4	19,7	35,7	16,7	47,6	6,7	49,0	11,8	39,2
FI3	29,8	19,9	19,7	60,4	28,7	17,7	20,3	62,0	57,7	20,5	20,9	58,6	28,2	24,5	18,6	56,9
FI4	23,0	32,1	14,9	53,1	29,2	24,7	13,3	52,0	35,5	30,6	9,5	57,9	2,6	58,0	7,1	34,9
DI1	47,5	22,9	15,5	61,6	35,8	34,3	12,7	53,0	4,5	46,4	10,9	42,7	1,8	44,0	8,0	48,0
DI2	20,8	25,7	16,8	57,5	17,9	23,7	17,3	59,0	15,0	28,0	16,0	56,0	2,0	41,7	8,9	49,4
DI3	35,0	25,9	17,6	56,5	47,1	21,6	17,7	60,7	35,2	47,2	9,6	43,2	6,0	46,6	10,1	43,3
DI4	44,6	20,9	19,9	59,2	41,9	29,2	17,9	52,9	76,8	44,7	14,4	40,9	26,5	57,5	6,6	35,9

L'istogramma di figura 4.2.4 mostra, per i profili di suolo investigati, le percentuali in peso delle particelle con $d > 0,2$ mm misurate alle diverse profondità. Ad eccezione dello strato più profondo (60-80 cm) le percentuali di scheletro sono risultate in generale elevate ed estremamente variabili lungo i diversi profili di suolo.

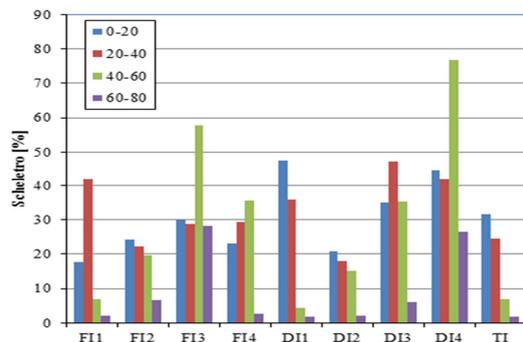


Figura 4.2.4. Percentuale in peso delle particelle con $d > 0,2$ mm presenti nei profili campionati, per le distinte profondità di campionamento.

Le figure 4.2.5, 4.2.6 e 4.2.7 mostrano, rispettivamente per le tesi TI, FI e DI, le curve granulometriche dei campioni di suolo rilevati, nei profili investigati, alle distinte profondità.

L'esame delle figure evidenzia che, per alcune tesi, si registrano notevoli differenze nelle caratteristiche tessiturali del suolo al di sotto dei 40 cm (TI, FI1, FI2, DI3 e DI4) o dei 60 cm (FI4 e DI2); le differenze alle diverse profondità sono invece più graduali nelle tesi FI2 e DI1 e molto limitate nella tesi FI3. L'apertura di due profili in corrispondenza della parte centrale delle tesi FI e DI ha permesso di prelevare, a diverse profondità tra 10 cm ed 80 cm, campioni di suolo indisturbato del diametro di 8,0 cm ed altezza pari a 5,0 cm, sui quali sono state determinate, oltre alle curve granulometriche, anche le curve di ritenzione riferite. Per la tesi FI il campionamento è stato interrotto alla profondità di 50 cm a causa della elevata presenza di scheletro, che non ha permesso l'estrazione, dal profilo, di ulteriori campioni di suolo indisturbato.

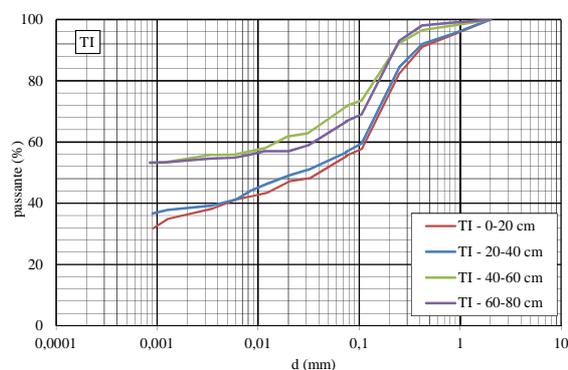


Figura 4.2.5. Curve granulometriche dei campioni prelevati alle diverse profondità nella tesi TI.

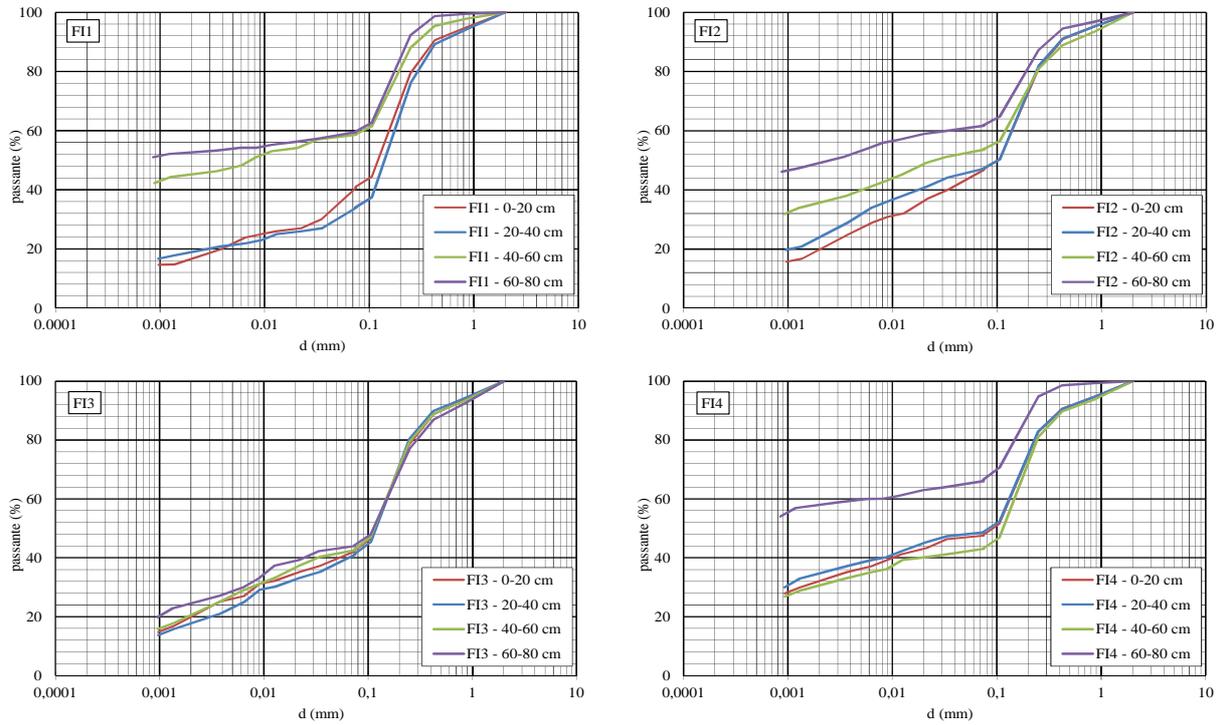


Figura 4.2.6. Curve granulometriche dei campioni prelevati alle diverse profondità nelle tesi FI.

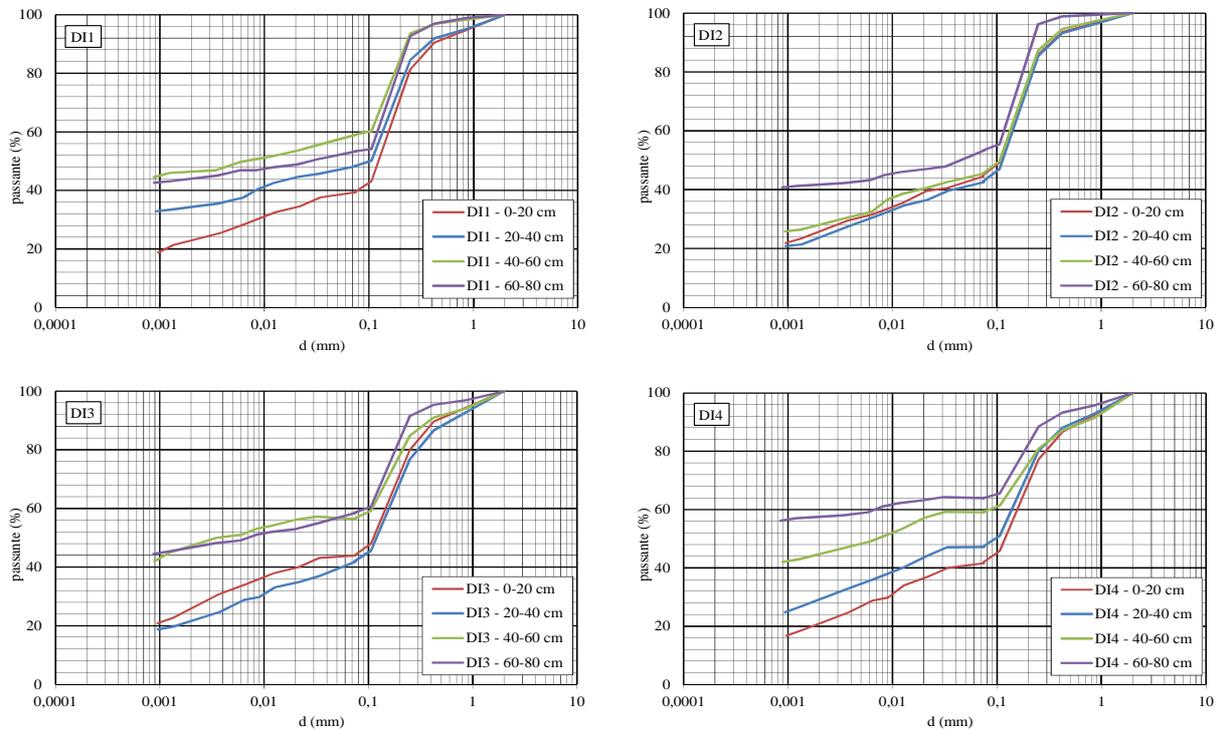


Figura 4.2.7. Curve granulometriche dei campioni prelevati alle diverse profondità nelle tesi DI.

La figura 4.2.8. mostra le curve granulometriche ottenute per le diverse profondità nei due profili ispezionati e le relative curve di ritenzione ricavate in laboratorio, utilizzando il metodo degli imbuti filtranti (Dane and Hopmans, 2002a) per i valori di potenziale matriciale h [cm] inferiori, in valore assoluto, a 120 cm e le piastre di Richards (Dane and Hopmans, 2002a) per i valori di potenziale matriciale pari a 1013 cm (1,0 bar), 3039 cm (3 bar) e 15195 cm (15 bar).

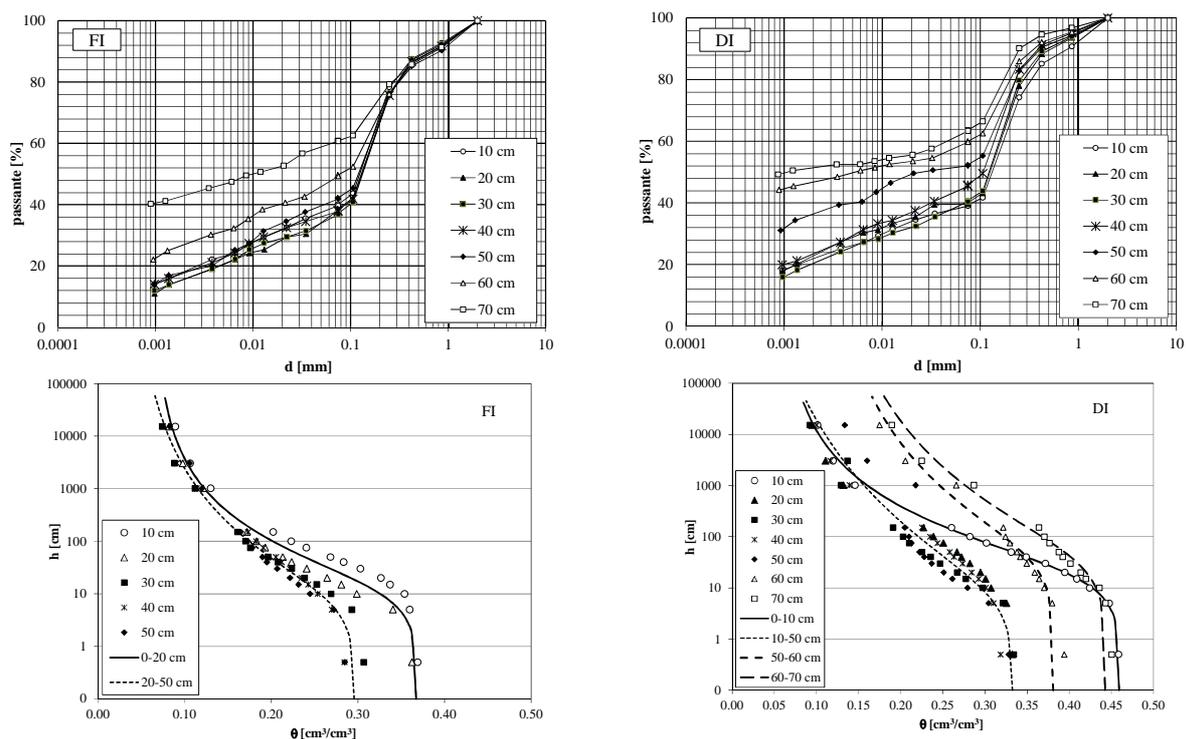


Figura 4.2.8. Curve granulometriche e relative curve di ritenzione ottenute sui campioni di suolo indisturbato prelevato, a diversa profondità, lungo i profili aperti in corrispondenza delle tesi FI e DI.

Sulla base dei risultati ottenuti e al fine di stimare i parametri dell'equazione di van Genuchten (van Genuchten, 1980) riportate in tabella 4.2.4, le coppie di valori $h(\theta)$ state aggregate per gli strati 0-20 cm e 30-50 cm con riferimento alla tesi FI, ed agli strati 0-10 cm e 20-50 cm per la tesi DI. Per quest'ultima tesi, le curve di ritenzione ottenute alle profondità di 60 cm e 70 cm, sono risultate notevolmente differenti da quelle degli strati più superficiali, come conseguenza delle maggiori percentuali di argilla presenti. Tuttavia, occorre evidenziare l'analogia che caratterizza le curve di ritenzione riferite agli strati intermedi (30-50 cm per la tesi FI e 20-50 cm per la tesi DI) dei due profili di suolo investigati, nei quali si localizzano le radici

delle piante ed hanno prevalentemente luogo i processi di attingimento radicale. In entrambi tali strati, sono risultati valori del contenuto idrico a saturazione intorno al 30% e valori del coefficiente di appassimento permanente di poco inferiori al 10%.

Tabella 4.2.4. Parametri delle curve di ritenzione, espressi secondo il modello di van Genuchten (1980), ottenuti alle diverse profondità nelle tesi FI e DI.

	Profondità [cm]	θ_s [cm ³ /cm ³]	θ_r [cm ³ /cm ³]	α [-]	n [-]	m [-]
FI	0-20	0,37	0,06	0,078	1,376	0,273
	20-50	0,30	0,04	0,124	1,248	0,199
DI	0-10	0,46	0,06	0,048	1,347	0,258
	10-50	0,33	0,00	0,140	1,152	0,132
	50-60	0,38	0,10	0,026	1,200	0,167
	60-70	0,44	0,10	0,028	1,200	0,165

La figura 4.2.9 mostra le dinamiche temporali delle variabili climatiche che caratterizzano il sito sperimentale durante il periodo di osservazione (secondo semestre 2017, 2018 e 2019). Nello specifico sono riportate, a scansione giornaliera, la temperatura minima e massima dell'aria [°C], l'umidità relativa minima e massima dell'aria [%], la radiazione solare [MJ/m²/d], la velocità giornaliera media del vento [km/h], le altezze di pioggia e le corrispondenti cumulate [mm] e, infine, l'evapotraspirazione della coltura di riferimento, ET₀ [mm]. La stagione estiva 2017 è stata caratterizzata da ondate di calore con valori massimi della temperatura dell'aria intorno ai 40°C; il periodo tra marzo e aprile 2018 è stato invece contraddistinto da temperature medie intorno a 20°C, con brusche oscillazioni di breve periodo, talvolta superiori ai 15°C. Le repentine riduzioni di temperatura, seguite da venti caldi dai versanti meridionali hanno influenzato negativamente le fasi di fioritura e allegazione, provocando la riduzione dell'allegazione ed una accentuata cascola dei frutticini.

Analogamente, l'ondata di calore associata a forti raffiche di vento dai versanti meridionali con valori di picco di 70 Km/h, verificatasi nella seconda metà di aprile 2019, ha provocato la disidratazione della porzione della chioma esposta a sud. Lo squilibrio della chioma ha determinato, intorno alla metà di maggio l'emissione di nuova vegetazione responsabile della cascola dei frutticini osservata nelle settimane successive.

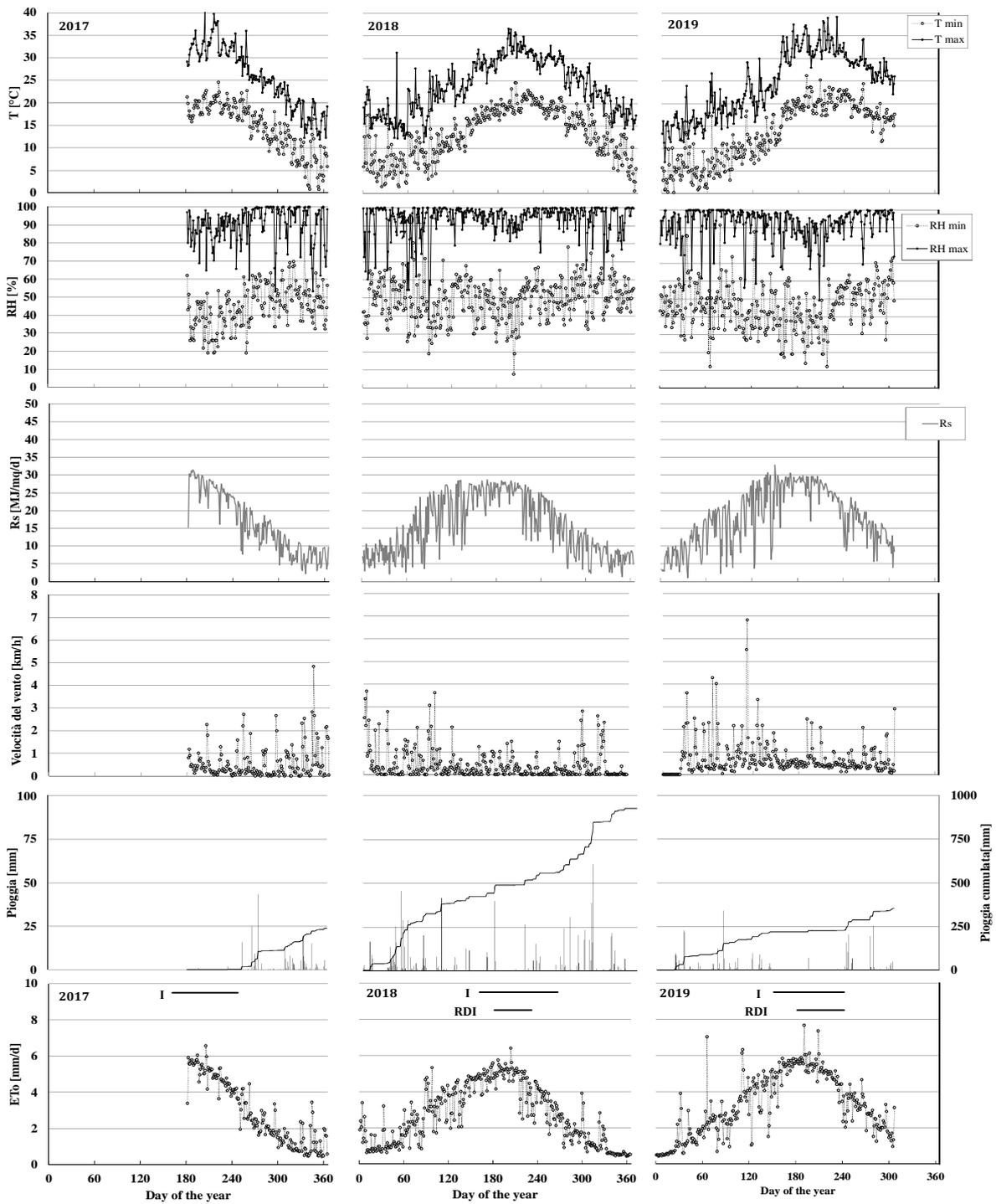


Figura 4.2.9. Dinamica temporale della temperatura T , [°C], dell'umidità relativa dell'aria RH [%], della radiazione solare R_s , [MJ/m²/d], della velocità del vento media giornaliera [km/h], delle altezze di pioggia [mm] e dell'evapotraspirazione di riferimento, E_{To} [mm/d] nel secondo semestre del 2017, nel 2018 e nel 2019. I e RDI indicano rispettivamente la stagione irrigua ed il periodo di applicazione del deficit idrico.

Nel corso delle tre stagioni irrigue esaminate, che hanno avuto inizio a giugno e si sono concluse a fine settembre (2017 e 2018) o a fine agosto (2019), si è verificata una certa variabilità nella distribuzione delle piogge, con altezze di pioggia stagionale di poco inferiore ai 70 mm nel 2017 e 2019 e di 180 mm nel 2018.

I valori massimi giornalieri di ETo, registrati nel mese di luglio sono risultati di circa 5,0-5,5 mm/giorno per il 2018 e 5,5-6,0 mm/giorno negli altri due anni; di contro, i valori più contenuti sono stati rilevati durante l'inverno, con valori inferiori a 1,0 mm/giorno. La distribuzione delle piogge e la loro entità, nei mesi precedenti le stagioni irrigue 2018 e 2019 è risultata parecchio differente, con un valore cumulato relativo al 2018 pari a circa il doppio di quello registrato nel 2019.

La tabella 4.2.5 sintetizza, nei vari anni di osservazione, le altezze di pioggia, P, l'evapotraspirazione potenziale, ETo, il deficit pluviometrico, P-ETo, e il volume irriguo totale per pianta V_{tot} , somministrato per le varie tesi ed il risparmio idrico conseguito nelle tesi FI e DI, rispetto alla tesi TI. Occorre tuttavia evidenziare che, con riferimento al 2017, i dati si riferiscono al periodo luglio-settembre, seguente l'installazione della stazione termo-pluviometrica, avvenuta a fine giugno.

Inoltre, per consentire alla pianta di ripristinare l'apparato radicale danneggiato dalle operazioni di installazione delle ali gocciolanti effettuate nel mese di giugno 2017, gli interventi irrigui sono stati effettuati secondo il metodo tradizionale a spruzzo; a decorrere dal 2018, invece, è stato attivato l'impianto di subirrigazione ed applicate le due diverse strategie irrigue (FI e DI).

Tabella 4.2.5. Altezze di pioggia (P), evapotraspirazione potenziale (ETo) e deficit pluviometrico (P-ETo), per le diverse tesi irrigue, nei tre anni di osservazione. Il volume irriguo stagionale per pianta (V_{tot}) e il risparmio irriguo (RI) rispetto alla tesi TI sono altresì riportati.

	Periodo	P [mm]	ETo [mm]	P-ETo [mm]		V_{tot} [l/pianta]	RI [%]
2017	Lug.-Sett.	62	403	341	TI	4571	
2018	Giu.-Sett.	180	518	338	TI	3864	-
					FI	3377	12,6
					DI	2178	43,6
2019	Giu.-Sett.	68	573	505	TI	6460	-
					FI	5553	14,0
					DI	4177	35,3

Nel periodo dall'1 giugno al 30 settembre del 2018 e 2019, i valori cumulati di ET_0 sono risultati rispettivamente di 518 mm, con una media di 4,3 mm/d, e 573 mm, con una media di 4,8 mm/d, a fronte di precipitazioni cumulate pari rispettivamente a 180 mm e 68 mm. Il deficit pluviometrico conseguente alla maggiore richiesta evapotraspirativa dell'atmosfera ed ai ridotti apporti meteorici è pertanto risultato maggiore nel 2019 (505 mm), comportando un aumento considerevole dei volumi irrigui somministrati rispetto alla stagione precedente.

La tabella 4.2.6 riporta, per i tre anni considerati e per le tre diverse gestioni irrigue esaminate il dettaglio del numero e delle ore di adacquamento effettuate, la portata mediamente fornita, il volume stagionale applicato a ciascuna pianta e le percentuali di risparmi idrico conseguite nelle tesi FI e DI rispetto a quella nella quale è stato mantenuto il tradizionale sistema irriguo a spruzzo, TI.

Tabella 4.2.6. Sintesi delle irrigazioni effettuate per le varie tesi irrigue nel triennio 2017-2019. Sono riportati il numero di adacquamenti (N), le ore di irrigazione (H), la portata media per pianta (Q_{med}), il volume totale stagionale per pianta (V_{tot}) ed il risparmio idrico conseguito nelle tesi FI e DI rispetto a TI.

	Tesi	N [-]	H [h]	Q_{med} [l/h]	V_{tot} [l]	RI [%]
2017	TI	7	14	326,5	4571	-
	TI	6	13,8	281,0	3864	-
2018	FI 1	22	78,1	43,7	3412	11,7
	FI 2	22	78,1	41,2	3214	16,8
	FI 3	22	78,0	44,2	3448	10,8
	FI 4	22	78,0	44,0	3435	11,1
	DI 1	15	51,0	40,3	2058	46,7
	DI 2	14	50,0	42,4	2118	45,2
	DI 3	15	50,3	45,5	2291	40,7
	DI 4	15	50,3	44,6	2243	42,0
2019	TI	9	20,4	315,0	6460	-
	FI 1	41	130,8	41,7	5450	15,6
	FI 2	41	130,8	40,6	5308	17,8
	FI 3	41	130,8	44,5	5827	9,8
	FI 4	41	130,8	43,0	5626	12,9
	DI 1	32	96,3	39,9	3847	40,4
	DI 2	32	96,3	43,7	4214	34,8
	DI 3	32	96,3	44,9	4321	33,1
	DI 4	32	96,3	44,9	4325	33,0

Le differenze tra gli anni in termini di durata degli adacquamenti e volumi complessivamente forniti sono da imputare alle differenti condizioni climatiche; d'altra parte, le differenze in termini di portata media erogata all'interno delle stesse tesi irrigue sono da attribuire alle pressioni di esercizio degli impianti dalla modalità di gestione dell'irrigazione. Come evidenziato in precedenza, l'elevato deficit pluviometrico ha comportato un incremento del numero e del volume irriguo nel 2019, che è risultato superiore, per oltre il 50%, rispetto all'anno precedente. Inoltre, in relazione ad alcuni eventi meteorici verificatisi alla fine del mese di agosto, nel 2018 è stato possibile sospendere temporaneamente le irrigazioni, limitando quindi i volumi irrigui stagionali. Dall'esame della tabella emerge inoltre che l'uso della subirrigazione ha permesso il contenimento dei volumi irrigui, con percentuali medie di risparmio idrico nel biennio 2018-2019 pari rispettivamente al 12,6% e 14,0% per le tesi FI ed al 43,6 e 35,3 per le tesi DI.

I sensori "drill & dropTM" installati nelle tesi irrigue FI e DI hanno consentito il monitoraggio della dinamica del contenuto idrico del suolo a diverse profondità e con scansione temporale di circa 20 minuti. La figura 4.2.10 presenta, a titolo di esempio, le dinamiche temporali del contenuto idrico del suolo alle diverse profondità per le tesi FI1 e DI2.

Come è possibile osservare, nel corso della stagione irrigua 2017, nella quale l'irrigazione è avvenuta utilizzando il sistema irriguo tradizionale a spruzzo, la maggiore variabilità del contenuto idrico del suolo, dopo ciascun adacquamento, si è verificata nello strato più superficiale (0-20 cm) mentre invece, negli anni 2018 e 2019 in cui è stato attivato l'impianto di subirrigazione, gli adacquamenti hanno permesso di umettare in prevalenza lo strato compreso tra circa 30 cm e 50 cm, risultando molto modeste le variazioni di θ alle maggiori profondità (>50 cm). Le più elevate variazioni di θ riscontrate negli ultimi due anni negli strati superficiali sono state causate da alcuni eventi meteorici verificatisi durante il periodo estivo.

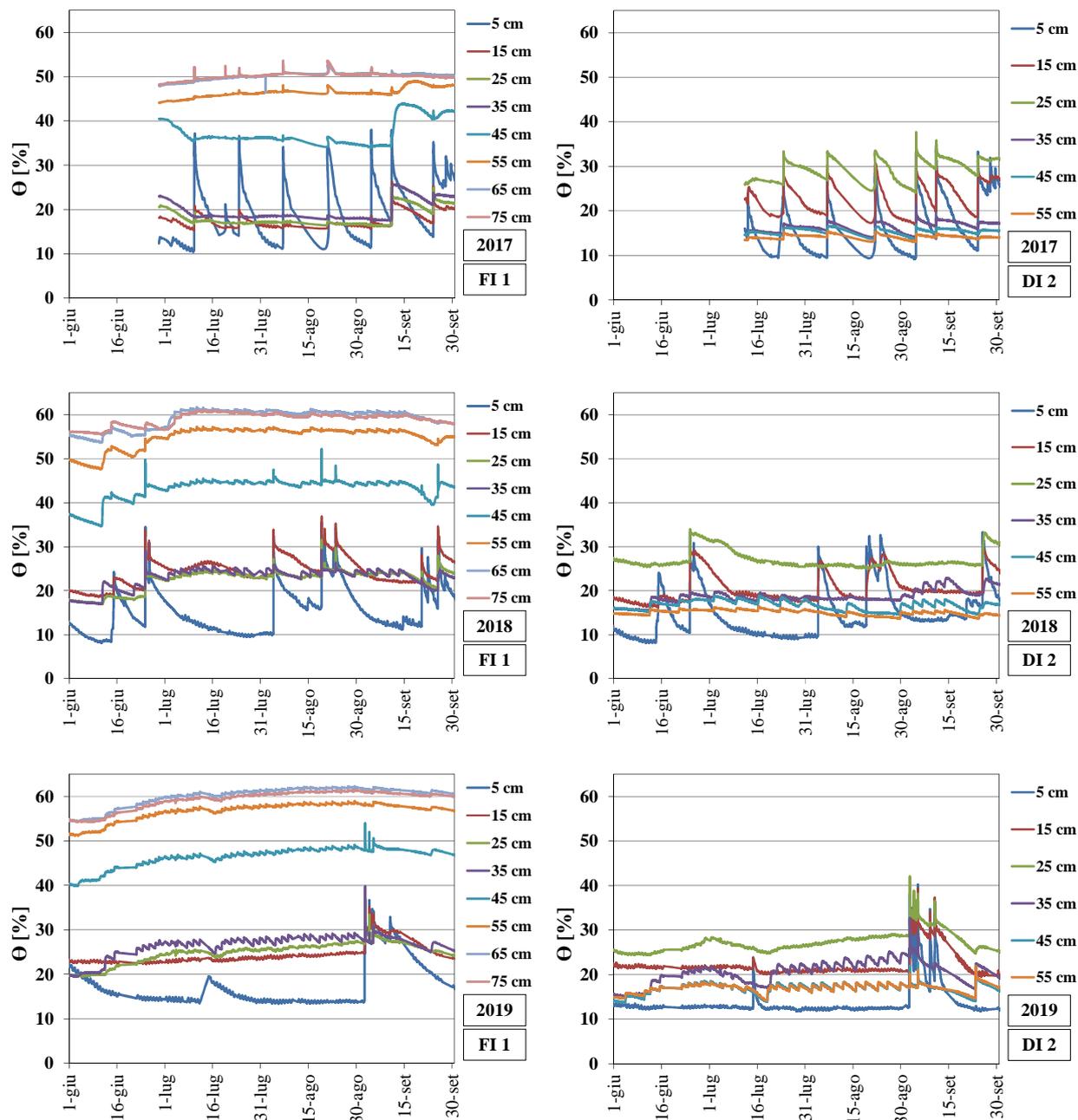


Figura 4.2.10. Dinamica temporale del contenuto idrico (θ) misurato a diverse profondità. Sono riportati i dati registrati dai sensori FI1 e DI2 nel periodo 1 giugno - 30 settembre per i tre anni di osservazione.

A titolo di esempio, la figura 4.2.11 mostra i profili di umidità conseguenti a due distinti adacquamenti effettuati nel 2017 utilizzando il sistema irriguo tradizionale a spruzzo (TI) e quello in subirrigazione (SDI). Nel primo caso, in conseguenza ad un adacquamento della durata di due ore, caratterizzato da un'altezza di pioggia $h=21,6$ mm, è stato complessivamente umettato lo

strato superficiale di terreno, per uno spessore di circa 20 cm, senza determinare significative variazioni negli strati più profondi.

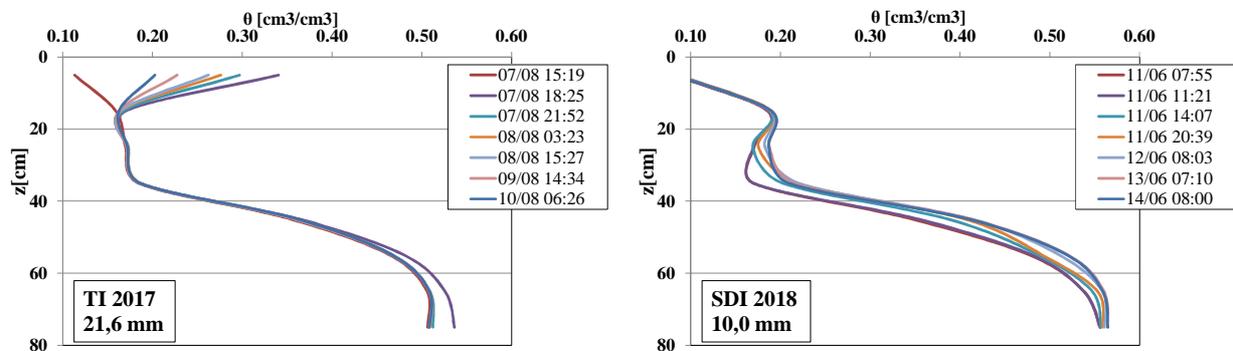


Figura 4.2.11. Dinamica temporale dei profili di umidità misurati prima e dopo un adacquamento effettuato con il metodo tradizionale a spruzzo, TI, nel 2017, e mediante subirrigazione, SDI, nel 2018.

Nella tesi SDI invece, l'adacquamento della durata di 5,5 ore ($h \approx 16$ mm), ha interessato lo strato di terreno compreso tra circa 20 cm e fino ad 80 cm, determinando l'incremento dei contenuti idrici negli strati di terreno a profondità maggiore di circa 50 cm, interessati solo parzialmente dalla presenza di radici. L'esame dei dati rilevati ha altresì permesso di osservare un ritardo nella risposta del sensore a registrare l'incremento del contenuto irriguo rispetto alla all'inizio dell'irrigazione; infatti, solo dopo circa tre dall'inizio dell'adacquamento, i valori misurati dal sensore tendono ad aumentare. Tale circostanza è una diretta conseguenza dei processi di distribuzione dell'acqua all'interno del profilo, oltre che della distanza relativa del sensore dal punto di erogazione. Il tempo necessario all'avanzamento del bulbo umido generato dal gocciolatore fino all'area di influenza del sensore ritarda la percezione delle variazioni di contenuto idrico conseguente all'adacquamento. Per le ragioni enunciate, per gli adacquamenti effettuati utilizzando l'impianto di subirrigazione si è impostata una durata di 3,5 ore, in modo da umettare esclusivamente il volume interessato dall'apparato radicale delle piante, evitando la percolazione profonda e, al contempo avere contezza, attraverso il sensore, dell'avvenuto adacquamento. Un altro aspetto che è stato tenuto in considerazione è quello relativo alle caratteristiche sito-specifiche del suolo, che influenzano in modo rilevante la risposta dei vari sensori lungo i profili di suolo investigati. La figura 4.2.12 presenta, a titolo di esempio e per un evento di pioggia particolarmente intenso di 39,9 mm registrato in circa due ore, le dinamiche temporali dei profili di umidità simultaneamente misurati dai vari sensori installati in campo.

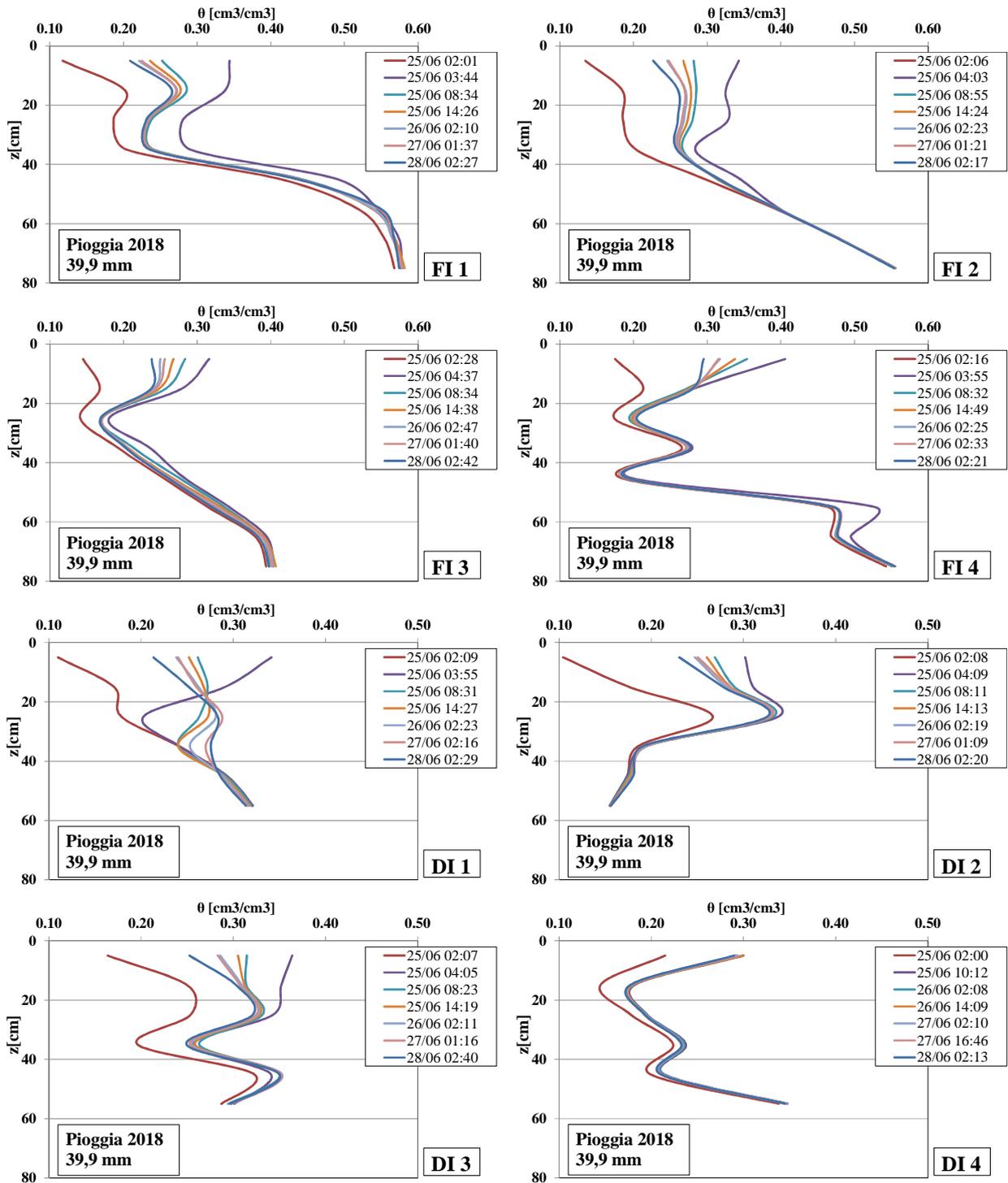


Figura 4.2.12. Profili di umidità in funzione del tempo per tutte le sonde installate, misurati prima e dopo un evento di pioggia intenso della durata di due ore (39,9 mm).

La figura mostra l'evolvere dei contenuti idrici a partire da condizioni di umidità relativamente basse (linea rossa), per poi incrementarsi repentinamente fino a raggiungere i rispettivi massimi al termine dell'evento di pioggia ed iniziare a decrescere negli intervalli di tempo successivi. La tesi DI1, a differenza delle altre, manifesta in modo più evidente la dinamica del processo di redistribuzione conseguente all'evento di pioggia. Infatti, dopo un primo incremento iniziale di θ in corrispondenza dello strato superficiale, è evidente la redistribuzione dell'acqua negli strati più profondi già dopo poche ore dalla fine della pioggia. Tale fenomeno, in relazione ai processi evapotraspirativi, continua anche nei due giorni successivi all'evento.

Per tutti i profili di suolo investigati risulta in generale evidente la drastica riduzione dei contenuti idrici a profondità comprese tra 20 cm e 40-50 cm, come conseguenza dei processi di attingimento radicale che, verosimilmente si manifestano in prevalenza nello strato di suolo profondo circa 50 cm. Dal confronto dei profili di umidità registrati dai diversi sensori, è possibile verificare come i valori misurati dei contenuti idrici, ivi compresi i valori massimi, risultino abbastanza diversificati e fortemente dipendenti dalle caratteristiche fisiche del suolo nell'intorno del sensore di misura

L'analisi della risposta dei sensori, contestuale all'esame delle curve granulometriche e delle particelle minerali che compongono il suolo (tabella 4.2.3), ha permesso di spiegare, seppur parzialmente, le differenze riscontrate. Così come identificato in precedenza per le curve granulometriche ottenute per alcuni profili di suolo alla profondità di circa 40-60 cm, quali ad esempio FI1 ed FI4, anche i sensori evidenziano differenze rilevanti nei contenuti idrici misurati alle corrispondenti profondità.

Ad eccezione del sensore installato nella tesi DI2 infatti, per tutti gli altri sensori è possibile riscontrare un generale aumento di θ alle profondità maggiori di circa 40-50 cm, che può essere attribuito all'aumento della frazione argillosa del suolo. La circostanza risulta più evidente nelle tesi FI1, FI2 ed FI4, nelle quali i valori del contenuto idrico del suolo stati misurati fino a 80 cm di profondità; a fronte di percentuali di argilla negli strati 40-60 cm e 60-80 cm pari rispettivamente al 45 e 52%, i valori misurati di θ sono risultati generalmente maggiori di 0,50 cm^3/cm^3 . Nella tesi FI3, nella quale le percentuali di argilla a profondità maggiori di 40 cm risultano inferiori rispetto alle altre tesi FI, sono stati misurati valori massimi del contenuto idrico del suolo proporzionalmente più bassi e pari a circa il 40%.

Oltre al contenuto di argilla, anche la presenza di scheletro può influire in modo rilevante sui contenuti idrici; la presenza di scheletro infatti modifica la risposta del sensore e dovrebbe essere oggetto di calibrazione sito-specifica. Un possibile esempio di tale situazione è quello riscontrato in corrispondenza delle tesi FI4 e DI4 che, alla profondità di circa 30-35 cm presentano un chiaro e repentino incremento di θ , che si mantiene costante durante tutto l'anno, causato verosimilmente dall'alto contenuto di scheletro presente nell'intorno del sensore di misura.

La dimensione della parte strutturale, è stata rilevata nelle piante in cui è presente il sensore di umidità alla fine della stagione irrigua del 2018. La tabella 4.2.7 riporta i diametri della pianta misurati all'altezza del colletto, nel punto di innesto, all'imbracatura e sulle branche primarie e secondarie. Come è possibile notare, il portinnesto presente in campo (*citrange* 'Carrizo') è caratterizzato da un effetto di rigonfiamento della porzione di tronco che va dal colletto al punto di innesto, con una rapida riduzione del diametro del fusto appena sopra quest'ultimo. La forma di allevamento si basa prevalentemente su due branche principali orientate in posizione nord e sud o, talvolta, su tre o quattro branche che occupano porzioni di 120° o 90°.

Tabella 4.2.7. Diametri delle varie parti della pianta, misurati al colletto (Col.), nel punto di innesto (Inn.), all'imbracatura (Imb.) e sulle branche primarie (Br I) e secondarie (Br II). Per le branche sono riportati il numero, i diametri medi e le relative deviazioni standard.

Tesi	Col. [cm]	Inn. [cm]	Imb. [cm]	Br I			Br II		
				N° [-]	μ [cm]	σ [cm]	N° [-]	μ [cm]	σ [cm]
FI 1	22,3	11,8	12,7	4	7,2	0,8	4	5,8	0,5
FI 2	20,7	11,8	14,3	2	9,0	0,3	6	6,1	1,1
FI 3	20,1	13,4	15,3	3	9,3	0,8	5	6,6	0,9
FI 4	17,2	10,2	11,8	5	6,5	1,5	8	4,4	1,1
DI 1	19,7	12,4	13,1	2	8,3	3,2	2	8,6	0,5
DI 2	22,6	15,6	15,9	2	9,2	1,4	4	7,1	1,0
DI 3	23,6	13,7	16,9	2	10,0	1,1	5	6,7	1,3
DI 4	19,1	13,4	15,9	4	7,2	0,3	7	4,8	0,9

Prima dell'inizio della seconda stagione irrigua (primavera 2019) sono state rilevate alcune variabili associate alla geometria delle piante e l'indice di area fogliare caratterizzanti le tesi irrigue gestite in subirrigazione (DI e FI), in modo da valutare possibili effetti generati dall'applicazione delle condizioni di deficit idrico applicate durante il 2018. La figura 4.2.13

riporta, sotto forma di box-plot, i rilievi dell'area di proiezione e del relativo volume della chioma, nonché l'indice di area fogliare, effettuati su 11 piante nei due trattamenti irrigui.

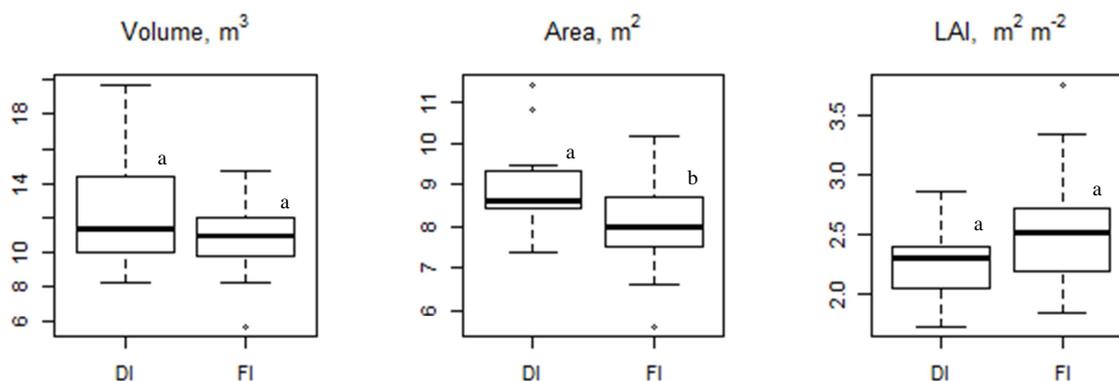


Figura 4.2.13. Box-plot relativi al volume delle piante, all'area di proiezione della chioma e all'indice di area fogliare (LAI) nelle tesi irrigue DI e FI. I punti presenti identificano gli outlier. Le medie con la stessa lettera indicano differenze non significative tra le tesi ($P < 0,05$).

Le due tesi hanno mostrato differenze significative esclusivamente per l'area di proiezione della chioma, che è risultata mediamente più elevata nelle tesi DI. Inoltre, con riferimento al volume della chioma, i valori medi ottenuti per le tesi DI risultano caratterizzati da una più elevata variabilità e in un range compreso tra circa 8 m^3 e 20 m^3 , rispetto alle tesi FI, per le quali la variabilità è risultata più contenuta.

Il volume della pianta e l'area di proiezione della chioma sono parametri strutturali che rappresentano lo stato di sviluppo della pianta nel lungo periodo e possono essere modificati solamente attraverso gli interventi di potatura. Di contro, il LAI rappresenta l'evoluzione della chioma nel breve periodo (2-3 anni) in conseguenza ai continui processi di emissione e senescenza delle foglie. L'applicazione di condizioni di deficit idrico nella stagione irrigua 2018 non ha prodotto differenze statisticamente significative in termini di LAI, anche se è possibile notare in DI un valor medio del parametro in esame leggermente inferiore rispetto a FI.

Considerate le modeste differenze riscontrate a livello globale della chioma tra le due tesi irrigue, i valori dei parametri rilevati sono stati utilizzati per indagare anche sulle possibili differenze tra le diverse porzioni della chioma dovute alla differente esposizione. Nella figura 4.2.14 sono rappresentati i grafici relativi al volume, all'area di proiezione della chioma ed al LAI misurati tenendo in considerazione l'esposizione della chioma secondo i quattro punti cardinali.

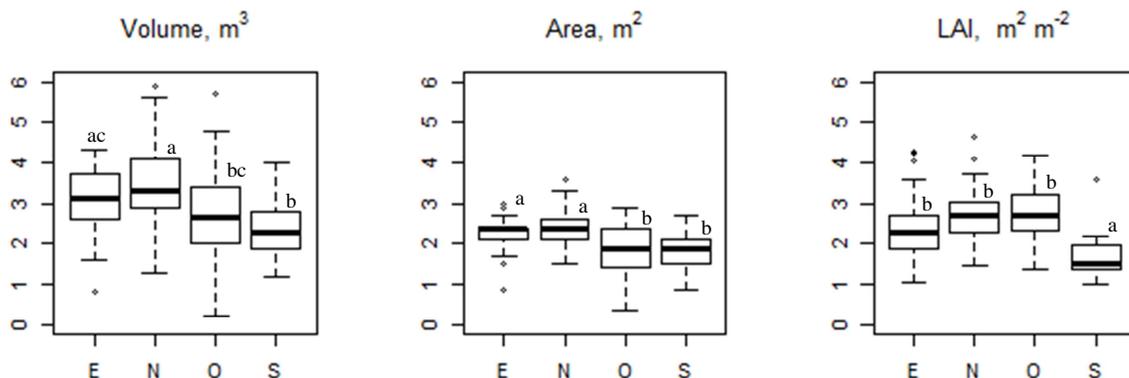


Figura 4.2.14. Box-plot relativi al volume delle piante, all'area di proiezione della chioma e al LAI, rilevati nelle porzioni di pianta esposte ad Est (E), Nord (N), Ovest (O) e Sud (S). I punti indicano gli eventuali outlier. Le medie con la stessa lettera non sono significativamente differenti per ($P < 0,05$).

L'esame della figura evidenzia come lo sviluppo della pianta, in termini di volume e di area di proiezione della chioma, si verifichi prevalentemente nella porzione esposta a nord (N) e ad est (E); infatti, come è possibile verificare, esistono in generale differenze statisticamente significative con le porzioni della chioma esposte a sud (S) e ad ovest (O).

Le differenze riscontrate nei parametri esaminati, in dipendenza dell'esposizione, indicano che nell'area di studio avvengono periodicamente dei fenomeni che incidono fortemente sullo sviluppo della porzione della chioma esposta ai venti caldi provenienti da S-O, soprattutto durante il primo periodo di sviluppo dei germogli, maggiormente suscettibili a disidratazione. Nel biennio di osservazione infatti, durante il periodo primaverile si sono verificate periodiche raffiche di venti caldi con provenienza dai quadranti meridionali che hanno danneggiato la nuova vegetazione e rallentato la crescita delle porzioni della chioma maggiormente esposte. In particolare, l'ondata di calore associata a forti venti, verificatasi tra il 20 ed il 21 aprile 2019

ha provocato la disidratazione e il successivo disseccamento dei germogli primaverili cresciuti nell'esposizione sud.

Con riferimento alla vegetazione asportata con l'intervento di potatura primaverile eseguito a fine aprile 2019, la tabella 4.2.8 indica le medie e le deviazioni standard associate del peso secco del legno (L_T), del totale delle foglie (F_T) e di un campione di 50 foglie (F_{50}). Sono inoltre riportati, con riferimento a quest'ultimo campione e per entrambe le tesi irrigue esaminate, i valori medi della superficie fogliare per unità di peso secco delle foglie (SF_{50}/F_{50}), nonché la

superficie fogliare totale asportata (SF_T) ottenuta indirettamente utilizzando il peso complessivo delle foglie asportate.

Tabella 4.2.8. Misure sulla vegetazione asportata durante l'intervento di potatura eseguito, nelle tesi FI e DI, nella primavera 2019. Sono riportate le medie e le deviazioni standard associate del peso secco del legno (L_T), del totale delle foglie (F_T) e di un campione di 50 foglie (F_{50}). Le medie e le deviazioni standard associate della superficie fogliare per grammo di peso secco di foglie (SF_{50}/F_{50}) e il totale della superficie fogliare asportata (SF_T) sono inoltre riportati.

Tesi	L_T [g]		F_T [g]		F_{50} [g]		SF_{50}/F_{50} [cm ² /g]		SF_T [m ²]	
	μ	σ	μ	σ	μ	Σ	μ	σ	μ	σ
FI	1789	629	636	261	5.74	0.94	87.95	8.75	5.60	2.30
DI	1517	584	643	301	5.84	1.20	87.81	10.59	5.64	2.65

Le misure effettuate hanno evidenziato, con riferimento alle due tesi irrigue, analoghi livelli di asportazione della vegetazione. I valori medi relativi al peso del legno, delle foglie e della superficie fogliare asportate nelle due tesi, nonostante le elevate deviazioni standard, risultano comunque abbastanza simili tra loro. Pertanto, sebbene nel corso della stagione 2018 le piante siano state soggette a due regimi irrigui differenti, esse non hanno evidenziato la necessità di un intervento di potatura differenziato. Le elevate deviazioni standard rilevate per i diversi parametri sono dovuti ad una variabilità interna del campo che, tuttavia, si tende a ridurre con l'intervento di potatura.

Il monitoraggio in continuo dello stato idrico nelle tesi irrigue in subirrigazione, compresa quella con impianto di irrigazione tradizionale a spruzzo, è stato eseguito tramite dei rilievi periodici di potenziale xilematico utilizzando la camera pressiometrica di Scholander.

La figura 4.2.15 mostra, per le tesi TI, FI e DI e nei due anni di osservazione, l'andamento del potenziale misurato all'alba (predawn leaf water potential, Ψ_{pd}) e nelle ore centrali della giornata (midday stem water potential, Ψ_{stem}).

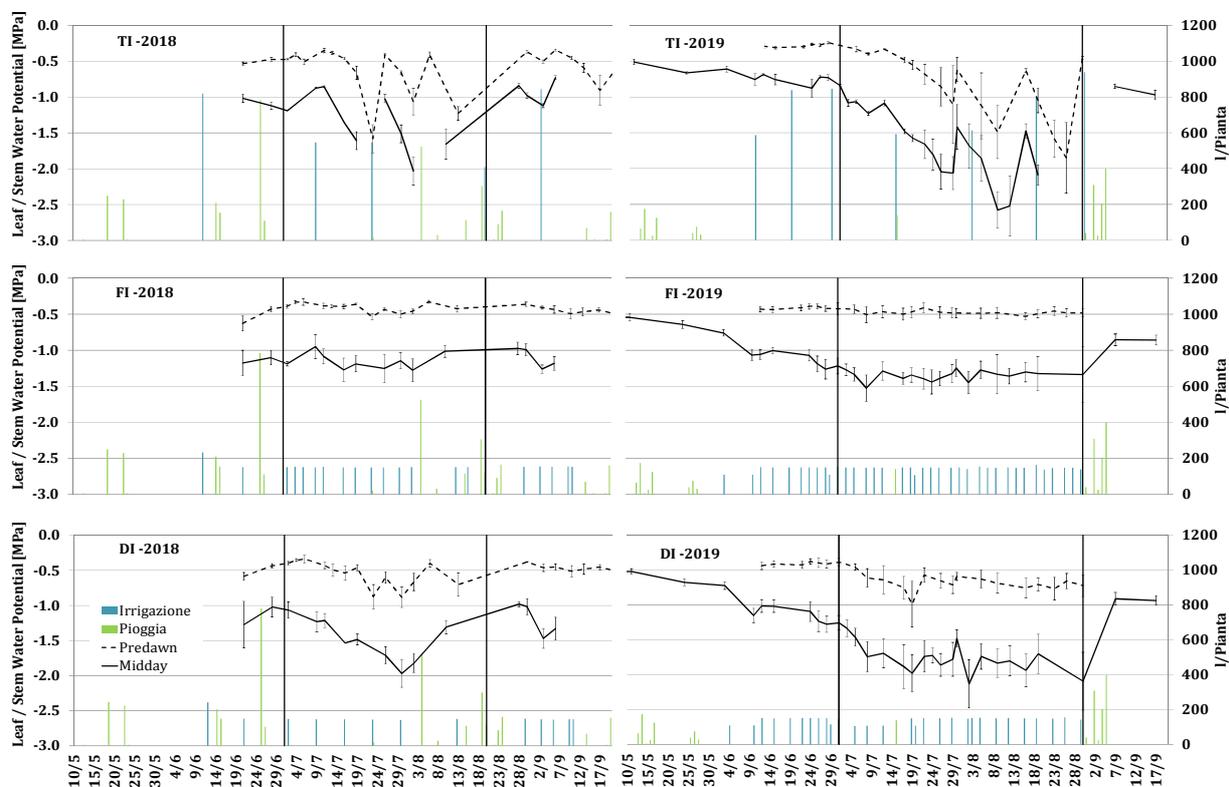


Figura 4.2.15. Dinamica temporale dei valori medi e delle relative deviazioni standard dei potenziali idrici predawn e midday misurati nel 2018 e 2019 sulle tesi irrigate con sistema tradizionale (TI) e mediante subirrigazione, con rifornimento idrico ottimale (FI) ed in condizioni di deficit (DI). Le linee verticali rappresentano il periodo di applicazione delle condizioni di deficit idrico.

In entrambi gli anni di osservazione, nonostante i maggiori volumi irrigui forniti utilizzando il tradizionale impianto irriguo rispetto alle parcelle in subirrigazione, i valori di potenziale in TI hanno evidenziato, soprattutto nei giorni antecedenti gli adacquamenti, livelli di stress da moderato ad elevato. I più elevati livelli di stress in TI sono risultati confrontabili, se non addirittura maggiori, ai corrispondenti rilevati in DI. Tuttavia, in relazione al diverso turno irriguo ed ai maggiori volumi forniti in TI, dopo ciascun adacquamento, le condizioni idriche della pianta sono state ripristinate, tanto da riportare i valori di potenziale (Ψ_{pd} , Ψ_{stem}) a valori simili a quelli misurati in FI.

D'altra parte, nelle tesi FI, i valori dei potenziali all'alba e nelle ore centrali della giornata sono risultati pressoché costanti e intorno a valori rispettivamente pari a -0,45 MPa e -1,20 MPa nel 2018 e -0,50 MPa e -1,30 MPa nel 2019, dimostrando condizioni di stress idrico assente o

limitato durante l'intera stagione irrigua. I frequenti adacquamenti hanno permesso alla pianta di soddisfare le necessità traspirative della coltura durante tutta la stagione irrigua, nonostante si siano applicati volumi irrigui stagionali inferiori di circa il 12-14% di quelli applicati con il tradizionale impianto a spruzzo.

Di contro, nelle parcelle mantenute in DI è stato registrato un graduale decremento dei valori di potenziale idrico (predawn e midday) che ha raggiunto livelli di stress da moderato ad elevato in conseguenza della riduzione dei volumi irrigui somministrati durante il periodo di applicazione del deficit idrico; i temporali estivi verificatisi nel mese di agosto e nella prima decade di settembre 2018 hanno contribuito a migliorare lo stato idrico della pianta, riducendo le differenze con le tesi FI. Nei periodi successivi ad entrambe le stagioni irrigue, il susseguirsi di un certo numero di eventi piovosi ha riportato i valori di potenziale nelle ore centrali della giornata a valori prossimi a -1,0 MPa, ripristinando condizioni ottimali di rifornimento idrico.

A seguito degli eventi climatici avversi verificatisi nei due anni durante le delicate fasi di fioritura e allegazione non è stato possibile rilevare gli effetti dell'applicazione del deficit idrico sulle produzioni che sono risultate, in tutte le tesi irrigue, molto limitate. Di contro, è stato tuttavia possibile monitorare lo sviluppo dei germogli primaverili (tra aprile e maggio) ed estivi (tra agosto e settembre). Le differenti modalità di distribuzione dell'acqua e dei volumi di adacquamento applicati hanno pertanto prodotto un diverso comportamento della coltura in termini di stato idrico.

Lo schema di tabella 4.2.9 riporta sinteticamente i periodi di fioritura e allegazione e le fasi di sviluppo dei germogli nei due anni di osservazione. E' appena il caso di osservare che i forti venti dai versanti meridionali verificatisi nella primavera del 2019, hanno determinato il blocco dell'attività vegetativa e la morte di parte dei germogli esposti sul lato sud della pianta. Tale evento ha determinato un ritardo nello sviluppo della vegetazione, che ha ripreso il germogliamento nella terza decade di maggio ed è proseguito fino alla fine di giugno, oltre che amplificato la naturale cascola dei frutticini che naturalmente si verifica nel periodo. Il ritardo nella vegetazione primaverile, associato ad un prolungato periodo di alte temperature ed all'assenza di piogge estive, ha pure ritardato il germogliamento estivo, che si è verificato tra la terza decade di agosto e la prima decade di ottobre.

progressive condizioni di deficit idrico, si è manifestata una riduzione del flusso di crescita. Se si considerano invece le differenze tra le porzioni della chioma esposte a nord ed a sud, le percentuali di germogliamento risultano simili.

Analoghi risultati sono stati ottenuti nel 2019: la tesi DI, nella quale le condizioni di deficit idrico si sono protratte per tutto luglio ed agosto, ha manifestato percentuali di germogliamento estivo minori rispetto alle altre tesi irrigue. Le percentuali di germogliamento estivo in TI, sono risultate intermedie tra DI ed FI. Nello specifico, nonostante i maggiori volumi di adacquamento forniti in TI rispetto ad FI, le periodiche condizioni di stress alle quali è stata soggetta la tesi irrigua hanno determinato una minore percentuale di germogliamento estivo. Il confronto tra i valori ottenuti distintamente per le due esposizioni evidenzia come le maggiori percentuali di germogliamento estivo si siano determinate nella porzione sud nelle tesi TI e DI e nella porzione nord della tesi FI.

Tuttavia, il confronto dei risultati ottenuti nei due anni per ciascuna tesi irrigua mostra che nel 2019, indipendentemente dall'esposizione della chioma, si sono registrate percentuali maggiori di germogliamento estivo in conseguenza del ritardo temporale della crescita vegetativa e di condizioni climatiche più favorevoli allo sviluppo della nuova vegetazione.

L'applicazione di strategie di irrigazione deficitaria (DI) durante specifiche fasi del ciclo fenologico della coltura di agrumi può permettere la riduzione dei volumi di adacquamento stagionali senza compromettere il risultato produttivo (Martínez-Gimeno et al., 2018; Ballester et al., 2014). Tuttavia, appare evidente che influisce direttamente sullo sviluppo estivo delle parti vegetative, influenzando direttamente la biomassa futura della pianta. Quindi, per una corretta applicazione delle strategie DI, se da una parte è necessario effettuare il monitoraggio congiunto dello stato idrico del suolo e delle piante per poter identificare i parametri di programmazione dell'irrigazione appropriati (tempi e dosi), dall'altra occorre verificare la risposta di lungo termine della pianta, in modo da valutare gli eventuali effetti delle condizioni di deficit idrico, anche nelle stagioni produttive successive.

Con riferimento al primo aspetto, i rilievi effettuati utilizzando la rete di sensori installati in campo hanno permesso di identificare le soglie di intervento irriguo al di sotto delle quali iniziano a verificarsi condizioni di stress idrico nella pianta. Per ciascun sensore di umidità posizionato nelle due diverse tesi irrigue FI e DI, la figura 4.2.16 riporta le relazioni tra il potenziale predawn, ψ_{pd} [MPa], e il contenuto idrico medio nello strato 0-50 cm, θ [cm³/cm³].

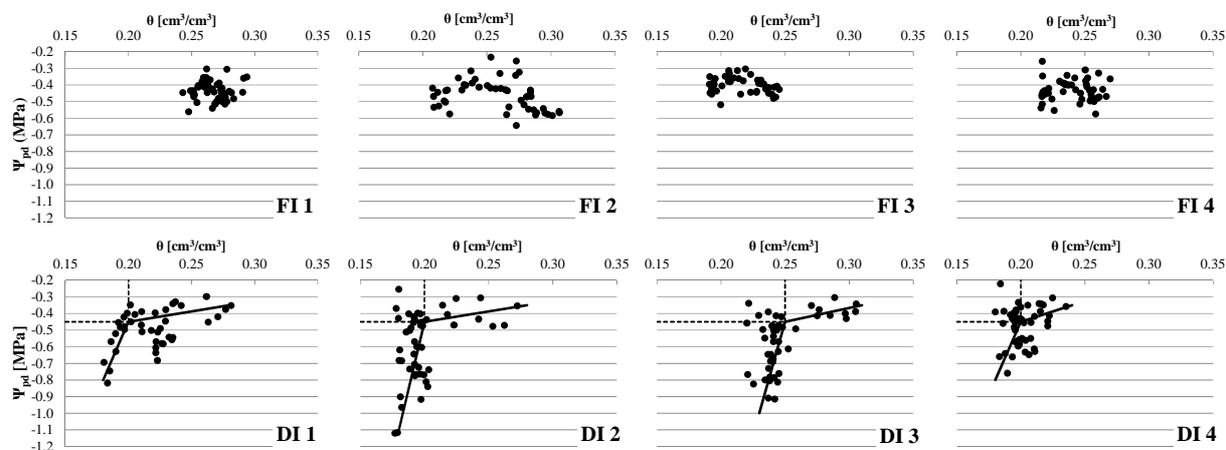


Figura 4.2.16. Relazioni tra il valor medio del contenuto idrico del suolo, θ [cm^3/cm^3] nello strato 0-50 cm, ed il potenziale idrico predawn, ψ_{pd} [MPa]. Le linee tratteggiate indicano i valori soglia nei quali si osserva il cambio della pendenza della relazione $\psi_{pd}(\theta)$.

Il potenziale idrico predawn nei due anni di osservazione è risultato pressoché costante in FI per diversi valori di θ e, come rilevato, le piante non hanno mostrato alcuna condizione di stress idrico, come peraltro confermato dalle osservazioni di stato idrico della pianta, oltre che dalla crescita vegetativa. Nei trattamenti DI invece, sono state riscontrate modeste riduzioni del potenziale predawn per valori di θ decrescenti dalla capacità di campo e fino ad un valore di circa 0,20-0,25 cm^3/cm^3 e diminuzioni più accentuate in corrispondenza di ulteriori riduzioni di θ . Poiché la variazione della pendenza della relazione $\psi_{pd}(\theta)$ si è verificata intorno al valore di $\psi_{pd} = -0,45$ MPa, per tutti i siti di misura e indipendentemente dalla variabilità locali delle caratteristiche del suolo, questo valore è stato assunto come soglia di potenziale idrico della pianta che identifica l'inizio della condizione di deficit. A tale valore soglia, riscontrato esclusivamente nella tesi DI, corrispondono valori di θ compresi tra 0,20 cm^3/cm^3 e 0,25 cm^3/cm^3 . L'intervallo dei valori di θ ottenuto implica che l'uso di tale parametro quale indicatore delle condizioni di deficit idrico delle colture introduce un livello di incertezza dovuto alla variabilità delle caratteristiche fisiche del suolo.

L'utilizzo dei valori di ψ_{pd} misurati in assenza di flussi traspirativi, cioè quando i potenziali idrici della pianta sono in equilibrio con quelli che caratterizzano il suolo e non dipendono dalla richiesta evapotraspirativa dell'atmosfera, risulta certamente da preferire per definire la soglia di

intervento irriguo. Tuttavia considerato che tali misure sono dispendiose e poco pratiche, è stato anche considerato il potenziale misurato nelle ore centrali della giornata, ψ_{stem} , come possibile misura alternativa rispetto al ψ_{pd} .

La relazione tra ψ_{pd} e ψ_{stem} espressi in valori assoluti è riportata in figura 4.2.17. In corrispondenza della soglia di $\Psi_{pd} = -0,45 \text{ MPa}$, identificata come l'inizio delle condizioni di deficit idrico, sono stati misurati valori di ψ_{stem} , compresi tra -1,2 e -1,4 MPa. Il range di valori osservati ψ_{stem} a parità di uno stesso contenuto idrico del suolo può essere correlato alla diversa domanda evapotraspirativa dell'atmosfera al momento della misura (Ortuno et al., 2006). La relazione osservata tra ψ_{pd} e ψ_{stem} , è risultata non lineare, con una dispersione maggiore per valori di ψ_{stem} superiori a 0.8 [Mpa].

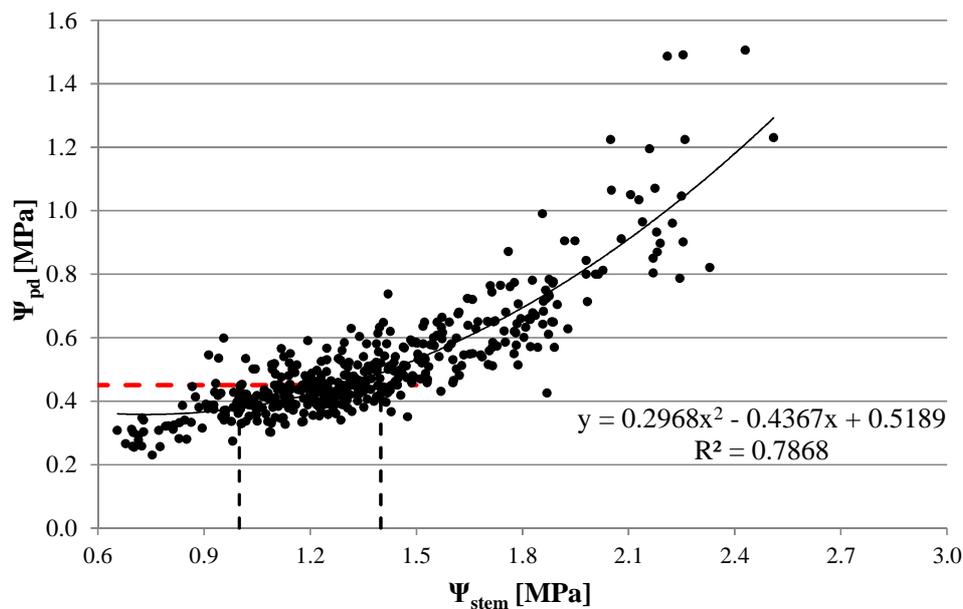


Figura 4.2.17 Relazione tra potenziale idrico misurato all'alba (ψ_{pd}) e quello misurato nelle ore centrali della giornata (ψ_{stem}).

Le misure del potenziale della pianta ottenute tramite la camera a pressione di Scholander sono state affiancate da misure in continuo effettuate con gli psicrometri PSY1 (ICT International, Armidale, Australia).

La figura 4.2.18 mostra, con riferimento al mese di agosto 2019, il monitoraggio dei potenziali effettuato in continuo con i sensori PSY1, e in specifici giorni utilizzando la camera a pressione di Scholander. Sono riportati inoltre, per l'intero periodo, i valori orari dell'evapotraspirazione della coltura di riferimento. I valori di potenziale xilematico rilevato dai vari sensori seguono l'andamento temporale di ETo, mostrando nei giorni di riduzione della richiesta traspirativa un aumento medio del potenziale. I valori minori, come atteso, si verificano nelle ore centrali della giornata, durante le quali si ha la massima richiesta traspirativa dell'atmosfera. Durante il periodo di osservazione, i valori rilevati dal sensore FI1 sono risultati in linea con quelli misurati con la camera di Scholander; di contro, con riferimento al sensore DI2, i valori corrispondenti si discostano notevolmente, risultando sensibilmente maggiori di quelli misurati mediante la camera di Scholander. Il dettaglio della dinamica dei potenziali xilematici registrati dai sensori FI3 e DI2 e relativi ad un periodo di quattro giorni è mostrato in figura 4.2.19. Così come descritto abbondantemente in letteratura l'andamento del potenziale segue un ciclo giornaliero di decremento durante il giorno e incremento durante la notte.

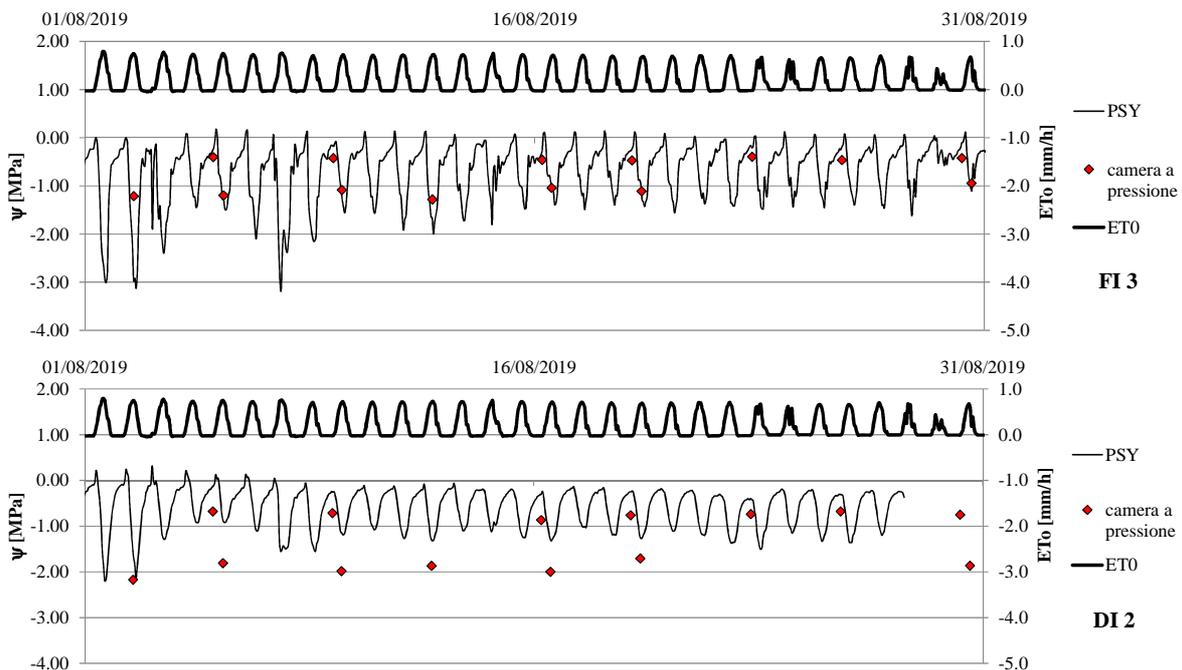


Figura 4.2.18 Dinamica temporale del potenziale ψ [MPa], misurati mediante il sensore PSY1 e tramite la camera a pressione nella tesi, FI3, DI2 durante il mese di agosto. I valori dell'evapotraspirazione di riferimento, ETo [mm/h] sono inoltre riportati.

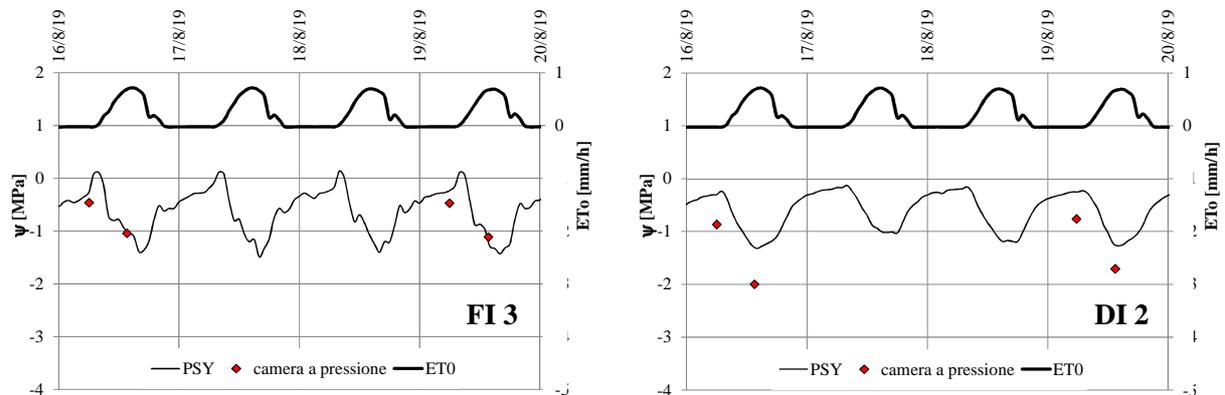


Figura 4.2.19 Dinamica temporale del potenziale ψ [MPa], misurati mediante il sensore PSI1 e tramite la camera a pressione nella tesi, FI 3e DI 2. I valori dell'evapotraspirazione di riferimento, ETo [mm/h] sono inoltre riportati.

I valori massimi nelle due tesi irrigue si verificano tra le 8:00 e le 9:00 del mattino in coincidenza della ripresa traspirativa delle piante, con uno *shift* temporale di circa 2-3 ore rispetto al massimo teorico che si dovrebbe manifestare prima del sorgere del sole. In modo simile, il valore minimo è registrato dai sensori alle 16:00 con lo stesso *shift* temporale misurato al mattino. In DI il potenziale presenta una fase stazionaria che inizia intorno alle 13:00 e si mantiene costante fino alla riduzione pomeridiana della richiesta evapotraspirativa, per poi incrementare durante la notte. Confrontando i valori ottenuti due diversi metodi di misura emerge la buona sovrapposizione delle misure in FI mentre in DI vi è un chiaro offset tra i due dati. L'origine di queste differenze è da ricercarsi nella posizione relativa dei due punti di misura e da fenomeni che riguardano la conduttività della pianta legati al manifestarsi di embolia in condizioni di deficit idrico prolungato. La misura di potenziale tramite la camera di Scholander si basa sull'assunto di una connessione idraulica tra le parti della pianta non limitata da fattori interni alla pianta. Quindi quando si blocca la traspirazione di una porzione di chioma, per un tempo sufficiente essa va in equilibrio con la parte connessa più vicina. In realtà soprattutto nelle gestioni deficitarie, una limitazione costante della disponibilità di acqua nel suolo può causare la formazione di embolie da cavitazione nello xilema (Hacke and Sperry, 2001). Le embolie riducono il flusso di acqua attraverso lo xilema, riducendo la connessione tra le varie parti della pianta. Questo fenomeno è reversibile ed gioca un ruolo fondamentale dei processi traspirativi di piante sottoposte a stress idrico. (Clearwater and Goldstein, 2005). In clementine la perdita di

conduttività a potenziali di -2 MPa, come quelli raggiunti in DI, può arrivare a valori del 40 % (Poggi et al., 2007). Quindi il fenomeno osservato potrebbe ricondursi ad una riduzione della connessione idraulica tra le due porzioni della pianta, dove nei pressi della branca si verifica un incremento del potenziale che non corrisponde a quello misurato sulle porzioni di germoglio. La limitata presenza di acqua non permette al sistema di ripristinare le embolie durante la notte e questo fa sì che anche i valori letti all'alba mantengono queste differenze.

Nella figura 4.2.20 sono riportati per le tesi FI3 e DI2 i valori di potenziale fogliare misurati ad intervalli orari durante il 29/07/2019. Come emerge gli effetti descritti in precedenza per la tesi in deficit sono manifesti anche in questo rilievo. Differentemente per la tesi FI i valori misurati dallo strumento, durante le ore più calde della giornata, assumono valori più bassi rispetto a quelli misurati con la camera a pressione, mentre i valori del potenziale predawn sono quasi coincidenti. In questo caso verosimilmente, data la non limitazione del rifornimento idrico, il potenziale misurato con PSY, data una maggiore conduttività idraulica dei tessuti, può rispecchiare il potenziale della foglia pienamente traspirante.

Questi aspetti di sicuro interesse necessitano di ulteriori approfondimenti prima di un utilizzo del sensore per applicazioni in automatico basate sulle misure ottenute.

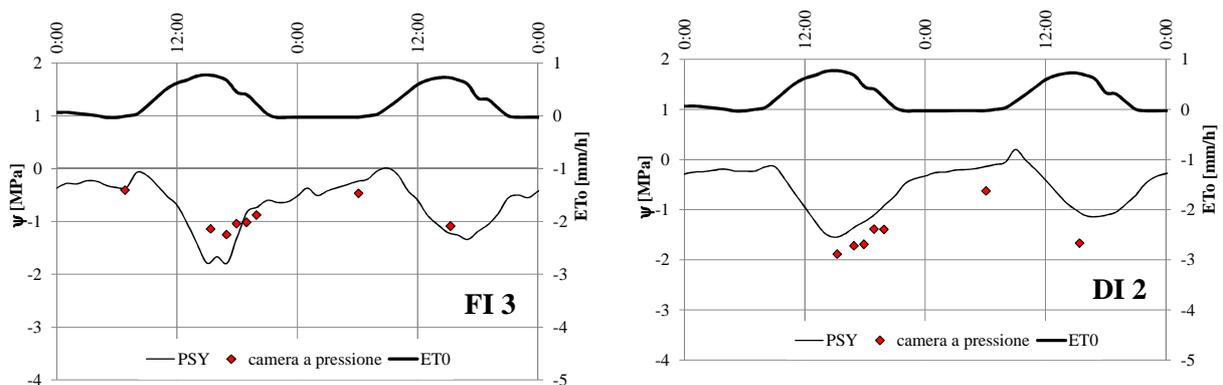


Figura 4.2.20 Dinamica temporale del potenziale ψ [MPa], misurati mediante il sensore PSY1 e tramite la camera a pressione nella tesi FI 3 e DI 2 il 29 e 30/07/2019. I valori dell'evapotraspirazione di riferimento, E_{To} [mm/h] sono inoltre riportati

I flussi traspirativi di due piante per tesi irrigua, sono stati monitorati con la configurazione dei sensori proposta da Granier (1985, 1987). La figura 4.2.21 mostra l'andamento temporale della densità di flusso, u [cm/min] misurata, durante il mese di luglio, dalle sonde posizionate sul tronco e sulla branca nelle tesi con ottimale rifornimento idrico (FI) e con l'applicazione di deficit idrico (DI). Per ogni pianta sono mostrati i dati relativi alla posizione delle sonde (Nord, Sud) nelle diverse parti della pianta. Per tenere in considerazione la richiesta atmosferica i valori dell'evapotraspirazione di riferimento orari ETo [mm/h] sono altresì riportati. Come è possibile notare gli andamenti della densità di flusso durante il periodo di misura seguono l'andamento orario di ETo, sia in presenza di giorni senza copertura nuvolosa, caratterizzati da un andamento continuo, sia nei giorni in cui la presenza delle nuvole riduce per parte della giornata la richiesta traspirativa, caratterizzati da rapidi decrementi e risalite di ETo. Confrontando i dati tra i due sensori posti in due diverse esposizioni (nord, sud), nelle diverse tesi, emergono delle piccole differenze nei valori misurati sulle sonde posizionate sul tronco (FI1 e DI1), e differenze un po' più accentuate sulle sonde posizionate sulla branca. In quest'ultime i valori più alti sono stati misurati nel sensore posizionato nella parte Sud della branca che corrisponde alla posizione esterna della branca. Queste differenze come riportato nella *review* di Lu et al (2004), possono essere generate da fattori dipendenti dalle condizioni specifiche del flusso all'interno del tronco causate da porzioni meno conduttive. I dati sono stati mediati tra le esposizioni per tenere conto di queste minime differenze generate dalla posizione del sensore.

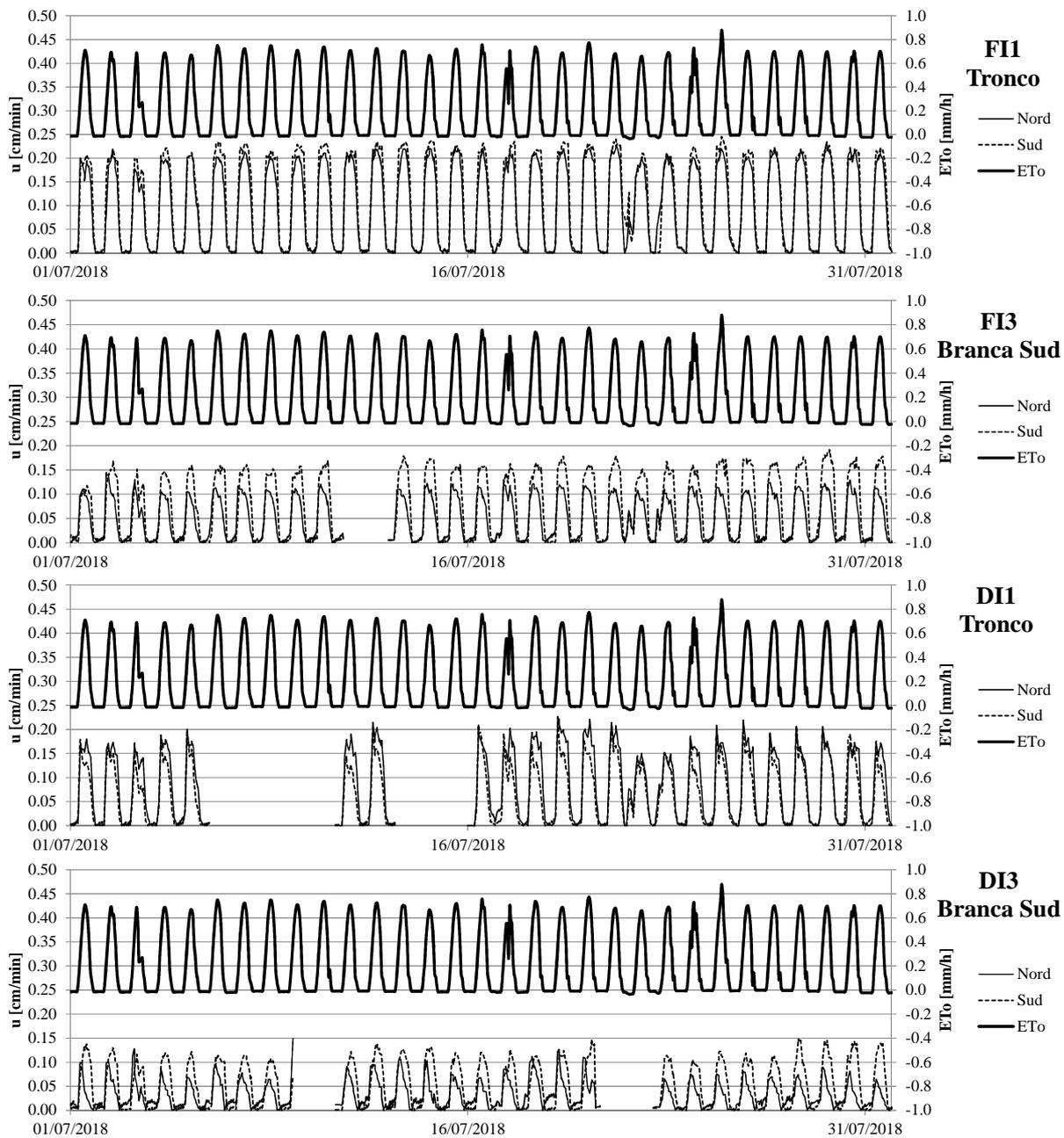


Figura 4.2.21 Andamento temporale della densità di flusso oraria, u , misurata dai sensori posizionati nella parte Nord e Sud del tronco (FI1 e DI1) e della branca sud (FI3 e DI3), e dell'evapotraspirazione oraria di riferimento ETo.

Le figure 4.2.22 e 4.2.23 mostrano gli andamenti temporali della densità di flusso, u [cm/min], e i valori orari dell'evapotraspirazione di riferimento ETo [mm/h] per l'intero periodo di acquisizione dei dati, rispettivamente nell'installazione dei sensori su tronco e su branca. In ogni figura sono riportate le due tesi irrigue per permettere un agevole confronto tra i dati. Analizzando l'andamento giornaliero dei flussi è evidente come nonostante l'applicazione del deficit la pianta durante il primo periodo del giorno e durante la sera, dove le richieste traspirative sono ridotte, riesca a sopperire alla domanda atmosferica. Nella prima parte del giorno il flusso è garantito dal parziale ripristino delle condizioni idriche della pianta che avviene durante la notte. Durante il giorno la ridotta disponibilità idrica del suolo, non è comunque sufficiente a ripristinare le condizioni di flusso come nelle tesi in FI. Nel periodo di applicazione del deficit irriguo che va dal 1/07/2018 al 20/08/2018 i flussi in DI sono sempre inferiori ad FI con effetti più marcati visibili nel fusto (FI1 e DI1) rispetto alla branca (FI3 e DI3). Queste differenze persistono, al netto di alcuni giorni dopo l'evento di pioggia del 20/08/2018, fino agli inizi del mese di ottobre dove a seguito delle piogge autunnali e della riduzione della richiesta traspirativa, le piante in deficit ripristinano le condizioni idriche, riducendo le differenze traspirative tra le tesi. Il protrarsi della riduzione dei flussi traspirativi anche dopo l'interruzione del periodo di deficit, può essere associato a due fenomeni congiunti: il primo è l'effetto negativo sul germogliamento estivo con riduzione da parte della tesi in deficit del 50% dei germogli rispetto a FI, il secondo riguarda la possibilità, che nella presente ricerca non è stata oggetto di specifiche osservazioni, che siano intervenuti fenomeni di formazione di embolie da cavitazione nello xilema (Hacke and Sperry, 2001) con significative riduzioni del flusso xilematico. Questo fenomeno è parzialmente reversibile nel ciclo giornaliero (Clearwater and Goldstein, 2005) e necessita di un periodo di tempo variabile a seconda della quantità di vasi coinvolti nel fenomeno (Schenk, 2012). Quindi la presenza ridotta di foglie con un'elevata efficienza traspirativa (foglie giovani) e la possibile presenza di embolie porta la tesi in deficit a mantenere più a lungo condizioni di riduzione dei flussi, ripristinati al seguito delle abbondanti piogge autunnali.

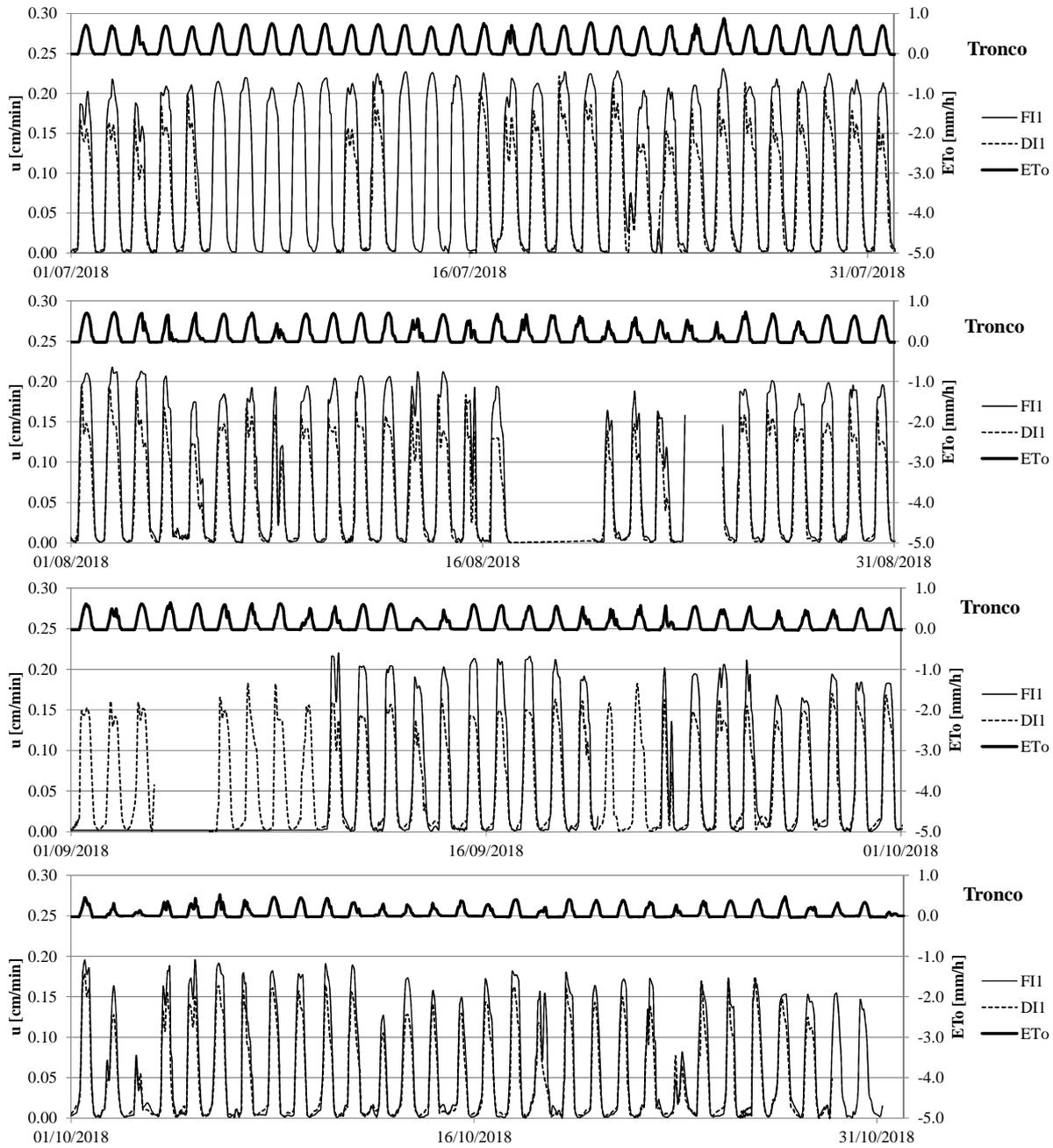


Figura 4.2.22. Andamento temporale della densità di flusso oraria, u , misurata dai sensori posizionati sul tronco (FI1 e DI1) e dell'evapotraspirazione oraria di riferimento ETo .

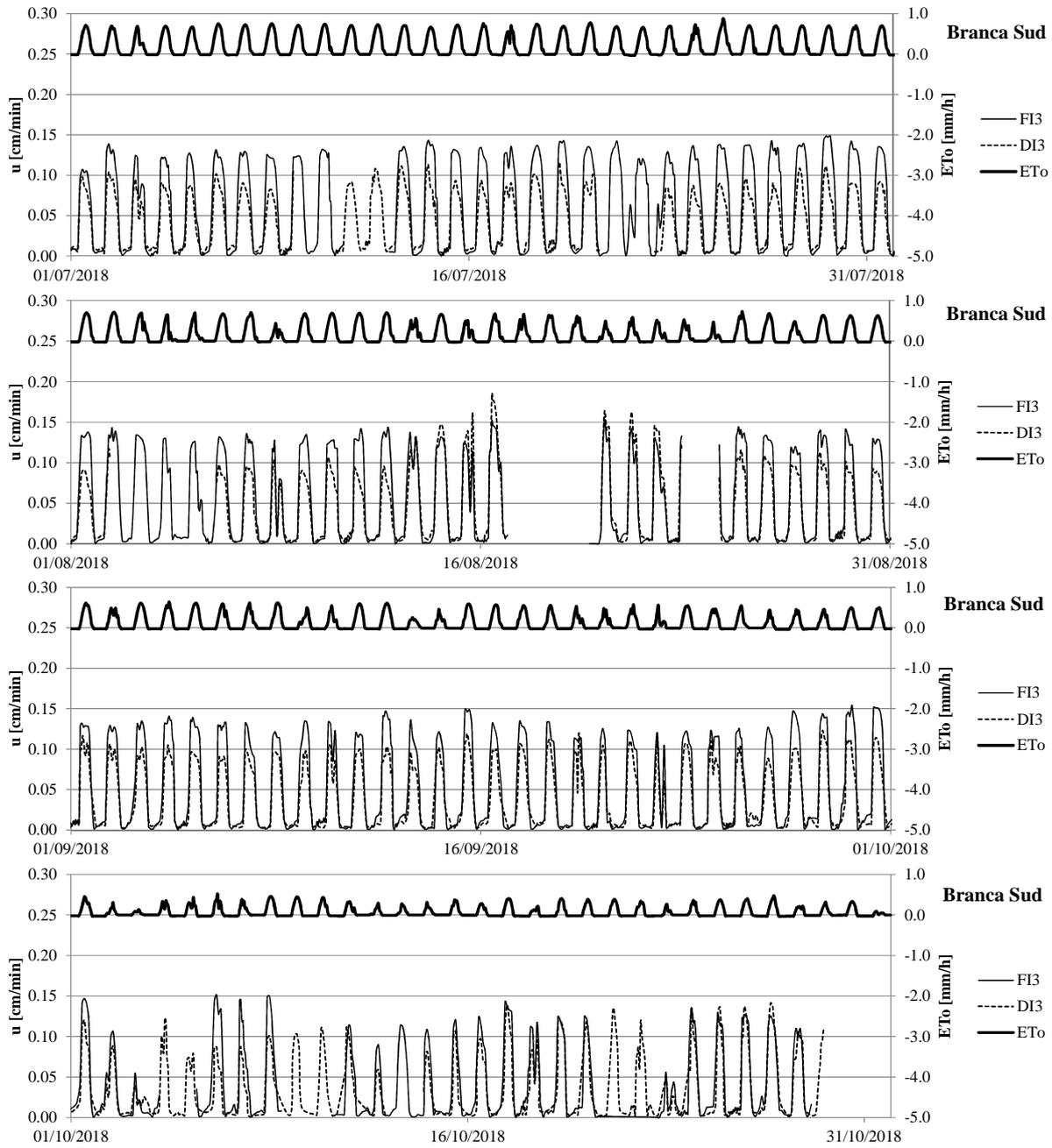


Figura 4.2.23. Andamento temporale della densità di flusso oraria, u , misurata dai sensori posizionati sulla branca (FI3 e DI3) e dell'evapotraspirazione oraria di riferimento ETo .

La figura 4.2.24 riporta la relazione tra densità di flusso orario, u [cm/min] e l'evapotraspirazione di riferimento oraria E_{To} [mm/h]. Come è possibile notare sia per i sensori posizionati sul tronco (FI1 e DI1) che per quelli posizionati sulla branca (FI3 e DI3), u presenta degli incrementi molto rapidi fino a valori di E_{To} prossimi a 0.2 mm/h, in questa fase il processo è limitato dalla richiesta evapotraspirativa. Per i valori maggiori di E_{To} , u , tende a crescere in modo limitato mostrando un limite fisico derivante dalla condizione idrica della pianta (disponibilità idrica della pianta, conduttività idraulica dei tessuti, superficie fogliare coinvolta nei processi traspirativi ecc.). Infatti se consideriamo i due trattamenti irrigui FI e DI, dove le condizioni idriche non sono limitanti (FI) si osservano valori maggiori di u , indipendentemente dalla posizione di misura (tronco o branca). Queste differenze sono meno evidenti per i valori di E_{To} inferiori a 0.2 mm/h, poiché questi valori sono associati a periodi del giorno, con basse richieste traspirative, prima parte della mattina e tardo pomeriggio, in cui la pianta anche se sottoposta a deficit può soddisfare le limitate richieste traspirative, come accennato in precedenza, o a periodi autunnali in cui le differenze tra le tesi sono minime.

Passando alla scala giornaliera è stata analizzata la relazione della densità di flusso, ud [cm/d], con il contenuto idrico medio giornaliero θ [cm³/cm³] dello strato di suolo tra 0-50cm in funzione di prefissati valori giornalieri di E_{To} [mm/d], riportati per i sensori posizionati su tronco (figura 4.2.25) e sulla branca (figura 4.2.26). L'aumento di ud , è governato principalmente dall'aumento di E_{To} . Nelle tesi FI, a parità di contenuto idrico, l'aumento di ud all'aumentare di E_{To} risulta maggiore rispetto alle tesi in deficit che presentano le varie nuvole di punti più ravvicinate. Per valori di E_{To} maggiori di 4 mm/d, l'incremento di ud si riduce, indicando una limitazione traspirativa della pianta legata a fattori interni della pianta, come la chiusura stomatica causata dalle alte temperature.

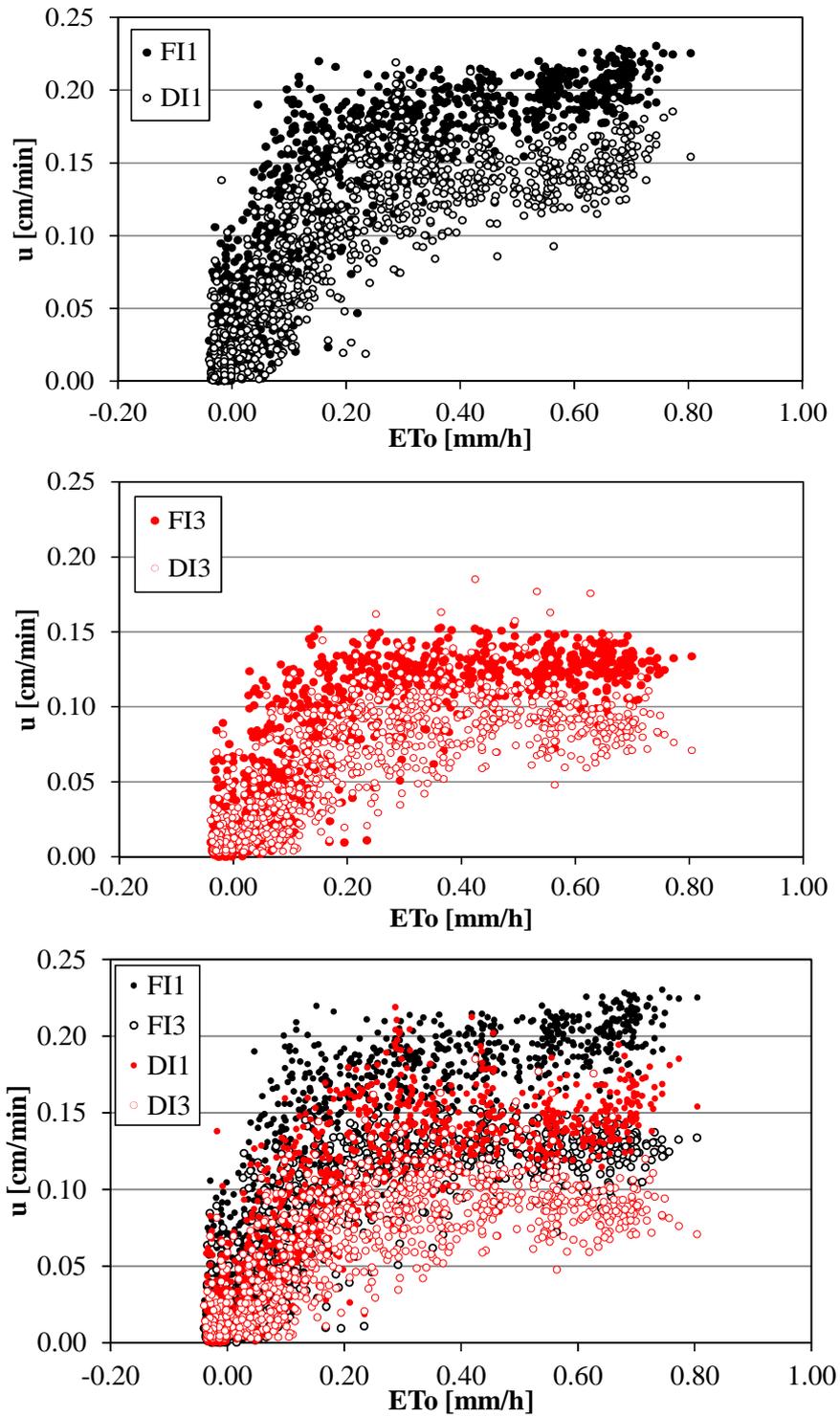


Figura 4.2.24. Densità di flusso orario, u , in funzione dell'evapotraspirazione di riferimento orario, ET_o . Rappresentati in base alla posizione sul tronco (FI1 e DI1), sulla branca (FI3 e DI3) e congiuntamente.

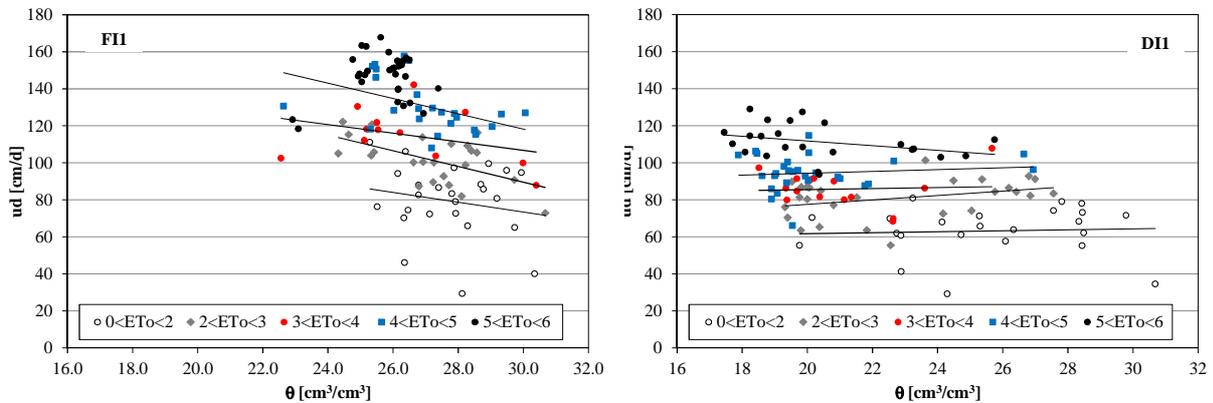


Figura 4.2.25 Densità di flusso giornaliero in funzione del contenuto idrico medio dello strato di suolo 0-50 cm, per prefissati valori giornalieri di ETo, nelle tesi FI1 e DI1

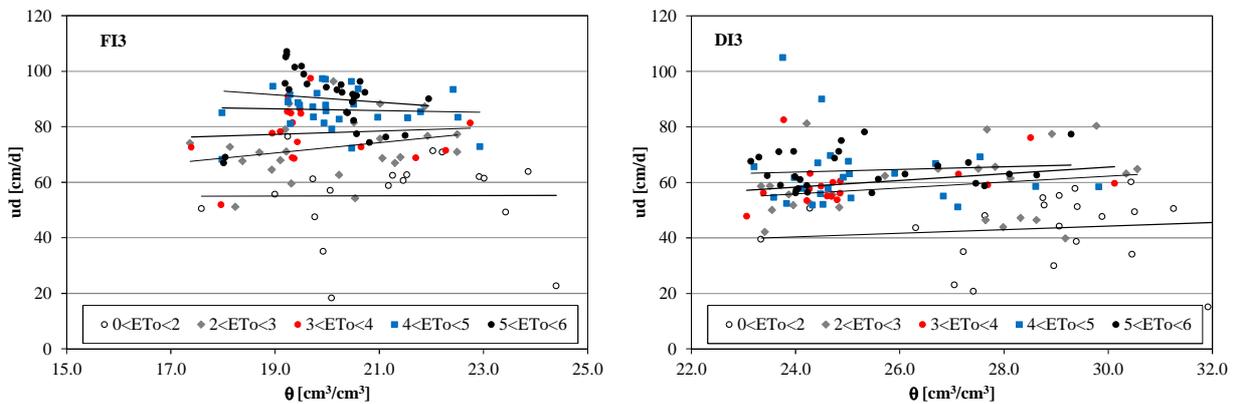


Figura 4.2.26 Densità di flusso giornaliero in funzione del contenuto idrico medio dello strato di suolo 0-50 cm, per prefissati valori giornalieri di ETo, nelle tesi FI3 e DI3.

Le figura 4.2.27 e 4.2.28 riportano rispettivamente, per i sensori nel tronco per quelli sulle branche, la relazione tra densità di flusso giornaliero, ud [cm/d] e l'evapotraspirazione di riferimento giornaliera $ET_{o,d}$ [mm/d], per valori prefissati di θ [cm³/cm³]. La relazione presente tra le due variabili, non risente delle differenze di contenuto idrico a scala giornaliera; i punti misurati tendono a sovrapporsi in tutte le tesi, ribadendo la forte dipendenza tra ud e $ET_{o,d}$. A scala di branca, pur rilevando la stessa tendenza nella relazione delle due variabili, si osserva una maggiore dispersione tra i punti, probabilmente in rapporto a fenomeni locali che coinvolgono solo parte della chioma (es.: dinamiche giornaliere di irraggiamento della chioma).

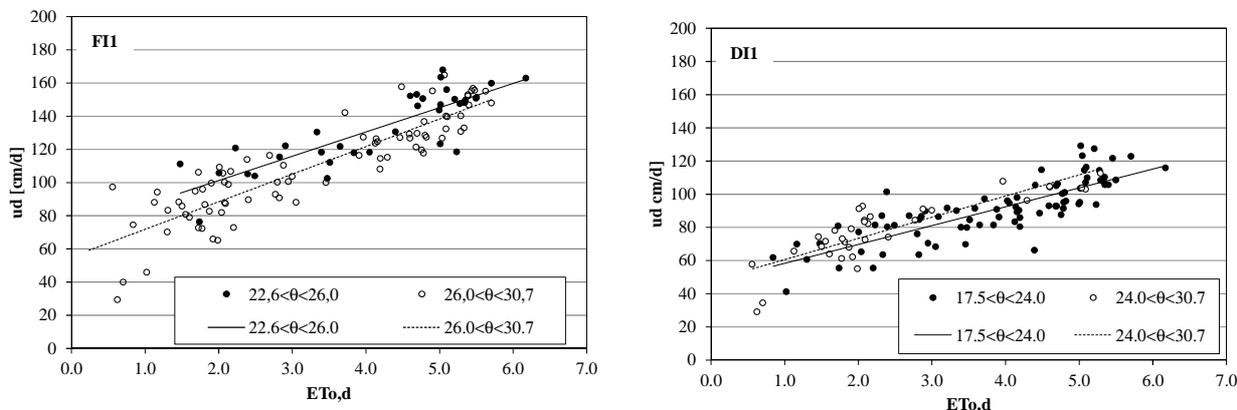


Figura 4.2.27. Densità di flusso giornaliero in funzione dell'evapotraspirazione di riferimento giornaliera $E_{To,d}$, per prefissati θ , nelle tesi FI1 e DI1.

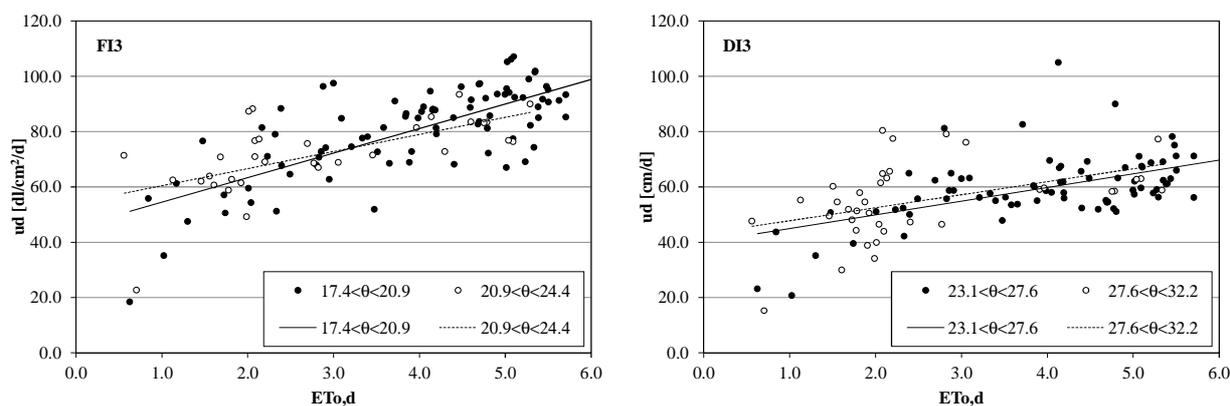


Figura 4.2.28. Densità di flusso giornaliero in funzione dell'evapotraspirazione di riferimento giornaliera $E_{To,d}$, per prefissati θ , nelle tesi FI3 e DI3.

Il passaggio dei dati da densità di flusso, u [cm/d], a evapotraspirazione effettiva della coltura, ETc_{act} [mm/d] ha tenuto in considerazione la dimensione del tronco e delle branche delle piante monitorate e la l'area di proiezione della chioma al suolo. Dalle misure effettuate sulla dimensione della chioma, l'area attribuita alla branca in cui sono installati i sensori è risultata pari a circa la metà dell'area totale della pianta. La figura 4.2.29 riporta gli andamenti temporali della evapotraspirazione effettiva della coltura, ETc_{act} , dell'evapotraspirazione di riferimento $E_{To,d}$ e dei contenuti idrici medi dello strato di suolo 0-50 cm registrati nella tesi FI1, FI3, DI1 e DI3.

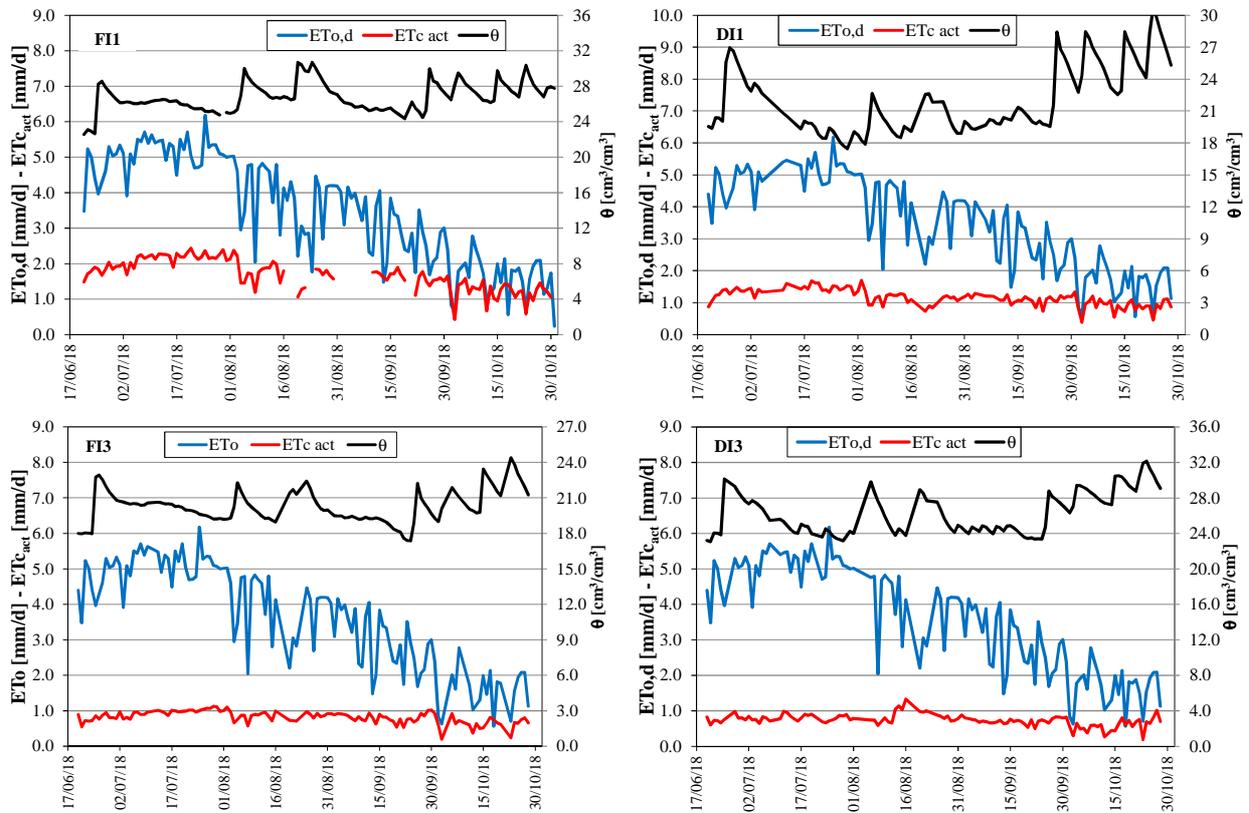


Figura 4.2.29. Andamento temporale della evapotraspirazione effettiva della coltura, $ET_{c,act}$, dell'evapotraspirazione di riferimento $E_{To,d}$ e dei contenuti idrici medi dello strato di suolo 0-50 cm registrati nella tesi FI1, FI3, DI1 e DI3.

Le tesi FI1 e DI1 mostrano le dinamiche di $ET_{c,act}$ dell'intera pianta, riportando nel periodo di irrigazione valori di circa 2 mm/d per la tesi FI e circa 1,0 mm/d per la tesi DI. $ET_{c,act}$ segue l'incremento di $E_{To,d}$ fino agli inizi di luglio per poi rimanere costante nelle due tesi fino all'insorgere delle piogge estive identificate dagli incrementi repentini di θ , che portano il terreno alla capacità di campo. A seguito di questi eventi e per effetto della riduzione della richiesta traspirativa $ET_{c,act}$ diminuisce nelle due tesi fino a quasi convergere con i valori di $E_{To,d}$ nei giorni successivi ad ottobre. Le tesi FI3 e DI3 mostrano le dinamiche di $ET_{c,act}$ considerando la metà della pianta, i valori in queste due tesi si mantengono pressoché costanti intorno ai valori di 1,0 mm/d per FI3 e 0,8 mm/d per DI3 pari a circa la metà dei flussi misurati posizionando i sensori sul tronco. Anche per questi sensori si sono verificate le stesse dinamiche descritte in precedenza per i sensori sul tronco.

Il rapporto tra $ET_{c,act}$ e $ET_{o,d}$, durante il periodo di studio rappresenta, secondo la schematizzazione FAO 56, il coefficiente basale della coltura, K_{cb} , per il coefficiente di stress K_s . La figura 4.2.30 riporta l'andamento temporale dei valori del rapporto tra $ET_{c,act}$ e $ET_{o,d}$ espressi come K_{cb} per K_s , per la tesi FI e DI considerando solamente i dati ottenuti sul tronco poiché rappresentativi dell'intera pianta.

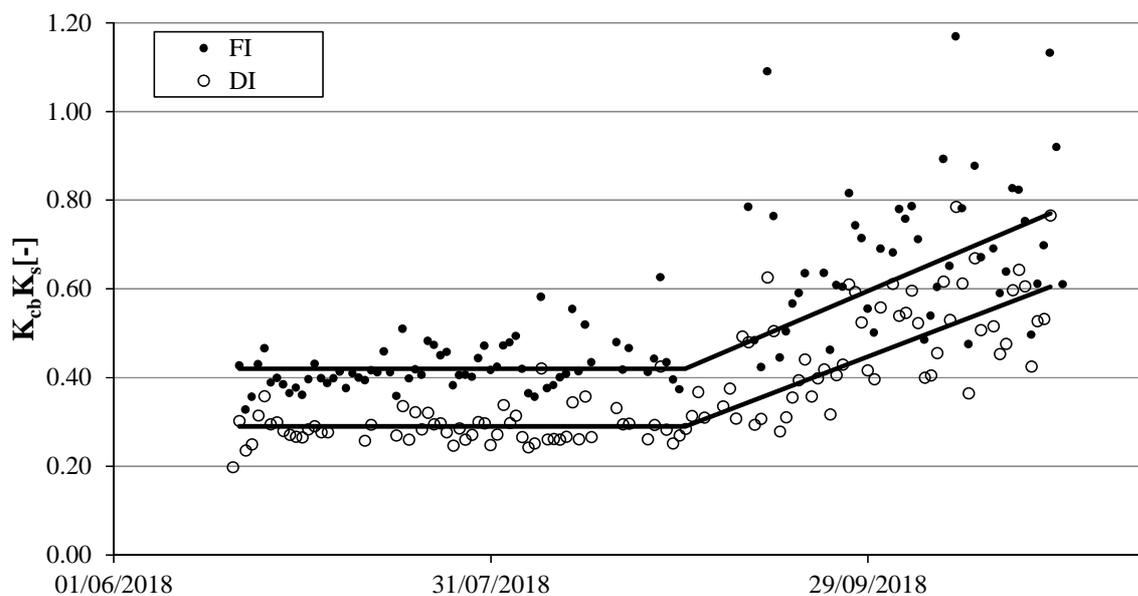


Figura 4.2.30. Andamento temporale del $K_{cb}K_s$, per le due diverse gestioni irrigue FI e DI.

Le due tesi differiscono durante il periodo di osservazione, con valori di $K_{cb}K_s$ pari a 0,4 per la tesi in FI e 0,3 per la tesi in deficit, costanti fino alla fine di agosto. Successivamente il ripristino delle condizioni idriche e la riduzione contestuale di ET_o porta un incremento di $K_{cb}K_s$ fino a valori intorno a 0,8 per FI e 0,6 per DI. Tali valori risultano prossimi a quelli del K_{cb} riportati la tabella 17 del quaderno FAO-56, per coltivazione di agrumi considerando l'effetto singolo della pianta (senza copertura vegetale al suolo). Il rapporto tra i valori ottenuti nelle tesi FI e DI rivela una condizione di stress sintetizzata dal coefficiente di stress K_s pari a 0,75.

Nell'anno 2019 l'implementazione del sistema di acquisizione e trasmissione dei dati ottenuti mediante le sonde a dissipazione termica per la misura del *sap-flow* ha permesso di utilizzare, un protocollo di misura volto al risparmio energetico con periodi di 10 minuti sia per il ciclo di riscaldamento che di raffreddamento. Il protocollo di misura utilizzato segue le indicazioni di Do et al. (2018) che hanno rielaborato il protocollo proposto originariamente da Do and Rocheteau (2002a, 2002b), successivamente validato in laboratorio, su diverse specie vegetali da Isarangkool Na Ayutthaya et al. (2010).

La figura 4.2.31 riporta sia gli andamenti temporali della densità di flusso misurati nelle branche nord e sud delle tesi FI3 e DI2, che la dinamica temporale di ETo. La densità di flusso segue la dinamica temporale dei valori di ETo in relazione alla richiesta traspirativa dell'atmosfera. Con riferimento alla tesi FI3 la branca posizionata a sud presenta dei valori di u , inferiori alla branca esposta a nord in tutto il periodo di osservazione. Tali differenze possono essere attribuite alla ridotta area fogliare presente nella porzione della pianta esposta a sud, conseguente ai forti venti di scirocco verificatisi durante il periodo vegetativo primaverile del 2019. Nella tesi DI2 la gestione irrigua deficitaria ha prodotto una generale riduzione dei flussi rispetto FI3, su entrambe le branche, evidenziando minime differenze tra le due porzioni della chioma. In quest'ultimo caso il fattore limitante per i processi traspirativi è una conseguenza delle condizioni di deficit idrico che hanno condizionato anche la porzione della pianta esposta a nord, nella quale non sono stati riscontrati danni alla vegetazione in conseguenza del vento di scirocco verificatosi nella primavera precedente. Le differenti dinamiche della densità di flusso si ripercuote anche su i livelli di crescita della vegetazione estiva, che si è verificata tra agosto e settembre. Nella tesi FI in cui la maggior parte del flusso si genera dalla nella branca Nord, si assiste contestualmente un maggiore germogliamento estivo, 71%, rispetto alla parte sud della pianta 63%. La figura 4.2.32 riporta per i sensori posizionati nelle FI3 e DI2, i valori di densità di flusso, u , in funzione dell'evapotraspirazione di riferimento oraria, ETo. L'analisi della figura permette di osservare un diverso comportamento tra le due tesi, e tra le due branche all'interno della tesi FI3. In quest'ultimo caso la branca esposta a sud mostra una densità di flusso minore rispetto alla parte nord per la maggior parte dei valori di ETo; inoltre, è possibile notare una maggiore dispersione dei valori di u per valori crescenti di ETo, con una generale riduzione della densità di flusso fino a valori prossimi a 0,05 cm/min che presuppongono un periodo di riduzione della traspirazione da parte della pianta.

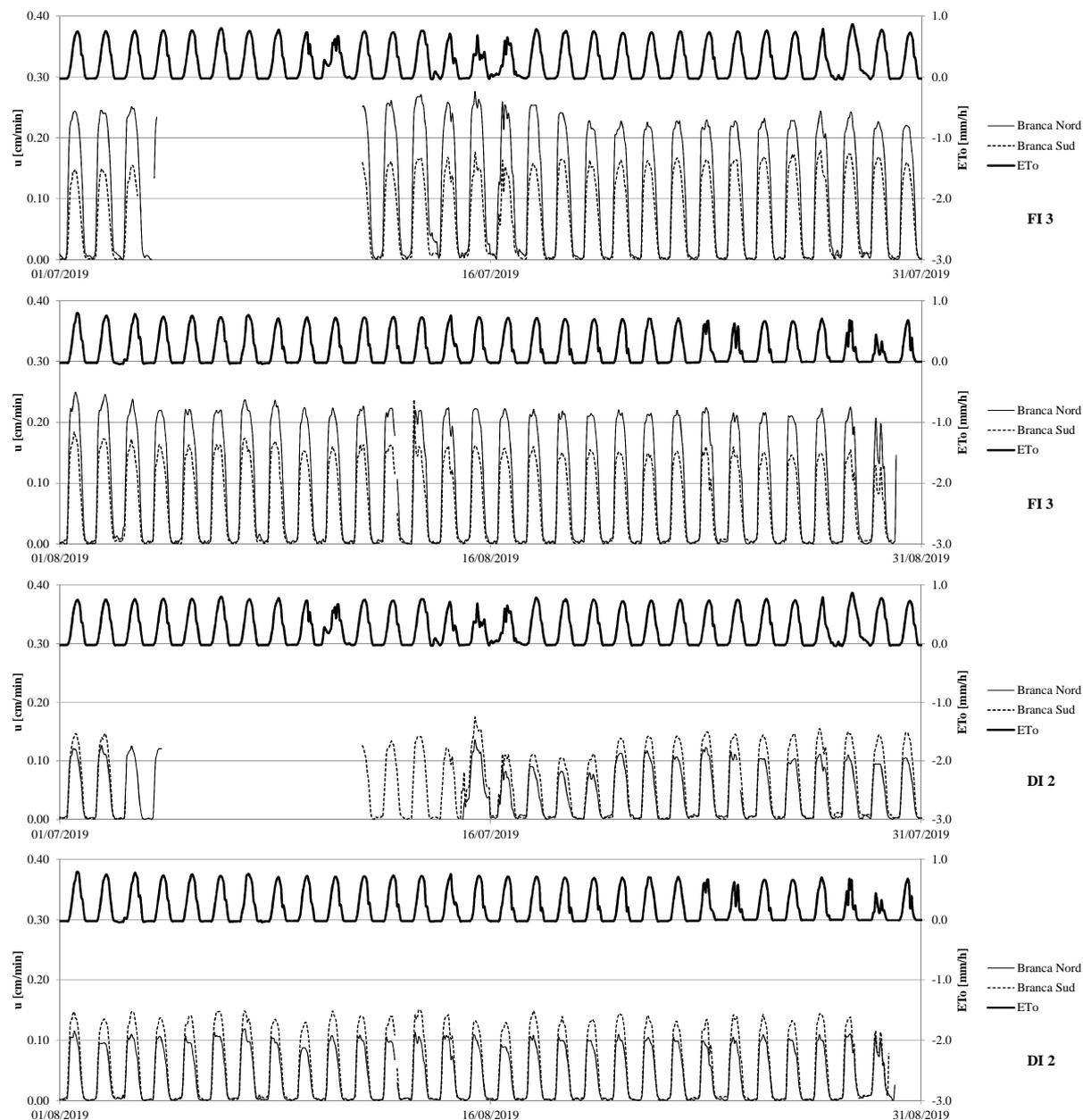


Figura 4.2.31 Andamento temporale per i mesi di luglio e agosto 2019, della densità di flusso, u [cm/min], misurata dai sensori posizionati sulle branche Nord e Sud nelle tesi FI3 e DI2, e dell'evapotraspirazione oraria di riferimento ET_o [mm/h].

Nella branca esposta a nord la dispersione risulta essere meno rilevante e, in concomitanza da elevati valori di ET_o (maggiori di 0,4 mm/h), i valori di densità di flusso non si riducono mai al di sotto del valore di 0,15 cm/min, indicando una condizione non limitante per la traspirazione. Queste evidenti differenze tra le due branche possono essere associate i) alla maggiore

insolazione della branca esposta a sud con conseguente incremento della temperatura della foglia e attivazione dei processi di regolazione stomatica; ii) all'effetto del danneggiamento della chioma a seguito dei venti caldi primaverili che hanno impedito la normale rigenerazione delle componenti traspiranti riducendo l'efficienza traspirativa della porzione di chioma sottesa dalla branca. La condizione di deficit idrico non permette di rilevare particolari differenze tra le due branche nella tesi DI2 in conseguenza alla limitazione idrica imposta, anche se in essa sono presenti analoghe differenze vegetative di quelle riscontrate in FI. Infatti, analogamente a quanto si è verificato nel 2018, il confronto tra i due trattamenti permette di rilevare differenze nei valori rilevati della densità di flusso più limitate per valori di ETo inferiori a 0,2 mm/h, che corrispondono agli intervalli di minore richiesta traspirativa (prima parte della mattina e tardo pomeriggio), in cui la pianta anche se sottoposta a deficit può soddisfare le limitate richieste traspirative.

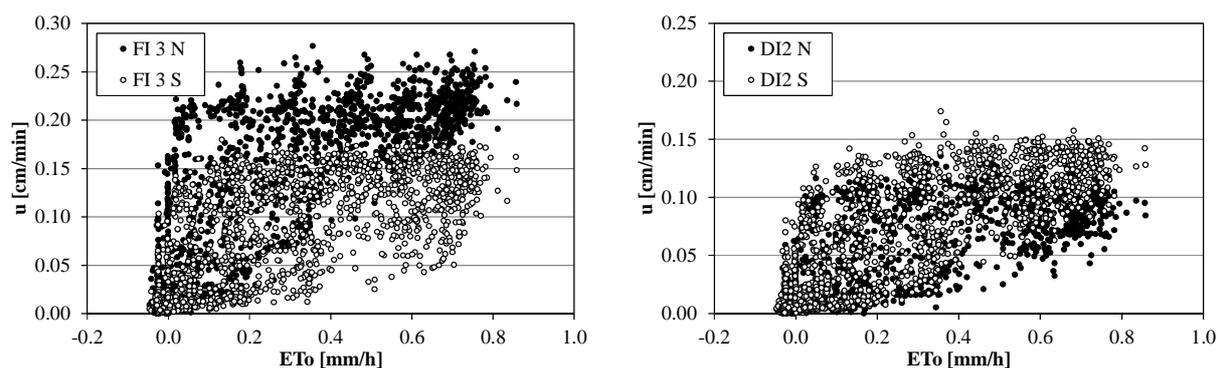


Figura 4.2.32. Densità di flusso, u , in funzione dell'evapotraspirazione di riferimento, ETo . Per le tesi FI3 e DI2 sono riportate le misure associate alla branca nord e sud della pianta.

La densità di flusso u [cm/min], è stata aggregata su base giornaliera, ud [cm/d], e convertita in evapotraspirazione colturale effettiva, ETc_{act} [mm/d] tenendo in considerazione la dimensione delle branche monitorate e l'area di proiezione della chioma al suolo della pianta

La figura 4.2.33 mostra l'andamento temporale della traspirazione effettiva della coltura, ETc_{act} , registrata nelle tesi FI3 e DI2, come pure i valori di evapotraspirazione di riferimento, ETo,d e dei contenuti idrici medi θ nello strato di suolo 0-50 cm, riscontrati nel periodo.

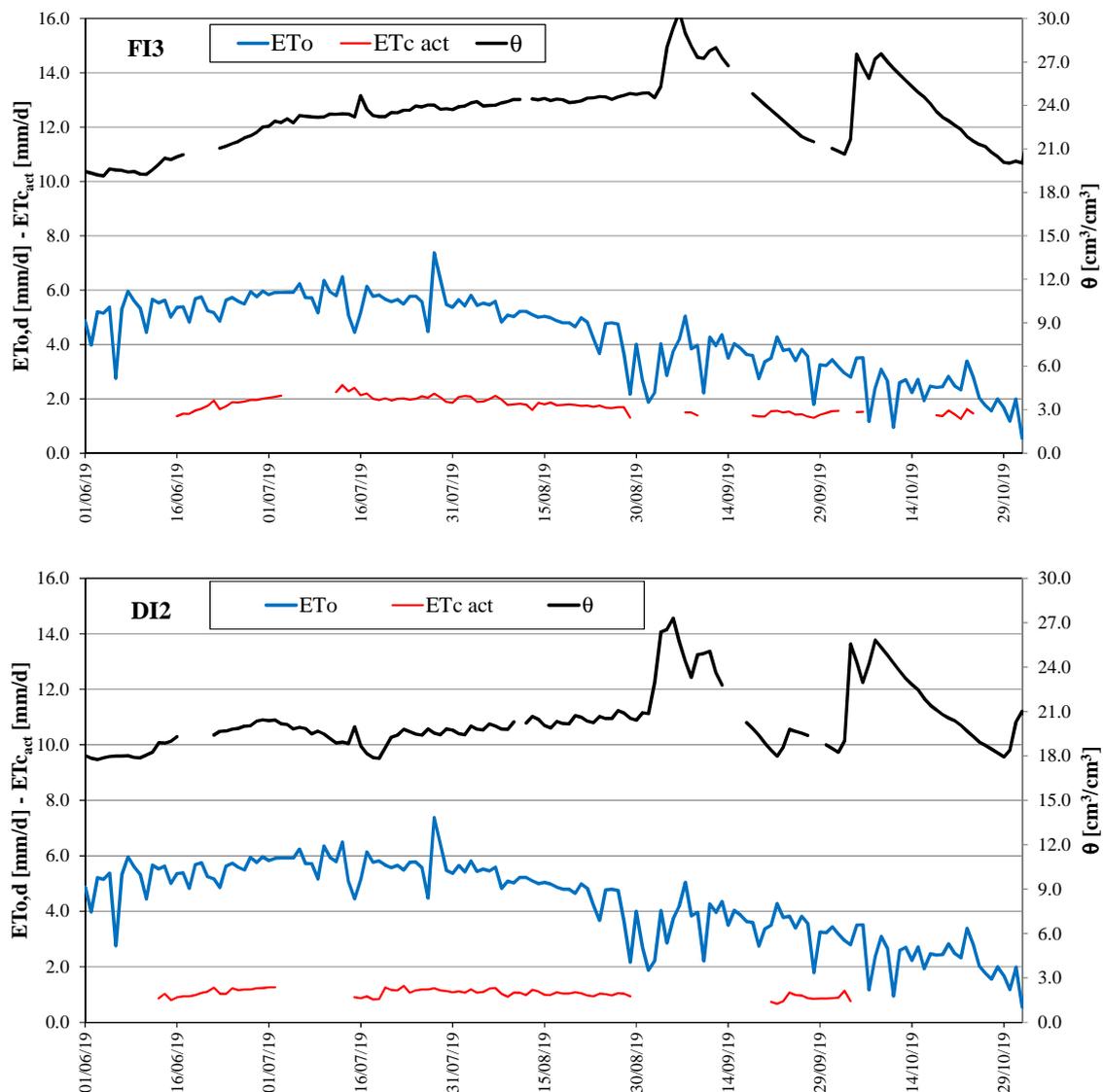


Figura 4.2.33. Andamento temporale dell'evapotraspirazione effettiva della coltura, $E_{Tc,act}$, nelle tesi FI3, DI2. L'evapotraspirazione di riferimento, $E_{To,d}$, ed i contenuti idrici medi dello strato di suolo 0-50 cm, θ , sono inoltre riportati.

La tesi in FI presenta un valore complessivo di $E_{Tc,act}$ maggiore per tutto il periodo di osservazione con valori che si mantengono al di sopra di 1,5 mm/d durante la stagione irrigua, con picchi di 2,0 – 2,5 mm/d, nella prima metà del mese di luglio caratterizzata dalla più elevata richiesta traspirativa dell'atmosfera. I valori di $E_{Tc,act}$ quindi tendono a diminuire con il proseguire della stagione irrigua, seguendo l'andamento di $E_{To,d}$. La tesi in DI presenta invece

valori pressoché costanti di $ET_{c,act}$, intorno a 1,5 mm/d, in conseguenza alle condizioni di deficit idrico imposte dalla strategia irrigua utilizzata.

Come è possibile osservare, i valori di $ET_{c,act}$ seguono l'andamento di $ET_{o,d}$ fino agli inizi di luglio per poi rimanere costanti nelle due tesi fino all'insorgere delle piogge, alla fine del periodo estivo, identificate dagli incrementi repentini di θ , che determinano nel terreno valori del contenuto idrico prossimi o superiori a quello corrispondente alla capacità idrica di campo. A seguito di tali eventi e per effetto della riduzione della richiesta traspirativa i valori di $ET_{c,act}$ tendono, nella tesi FI, ad approssimarsi ai corrispondenti valori di $ET_{o,d}$; di contro, nella tesi DI le differenze rispetto a $ET_{o,d}$ rimangono più marcate anche a seguito degli eventi di pioggia.

La figura 4.2.35 riporta i valori del rapporto tra $ET_{c,act}$ e $ET_{o,d}$ giornalieri, espressi come K_{cb} per K_s , per la tesi FI3 e DI2.

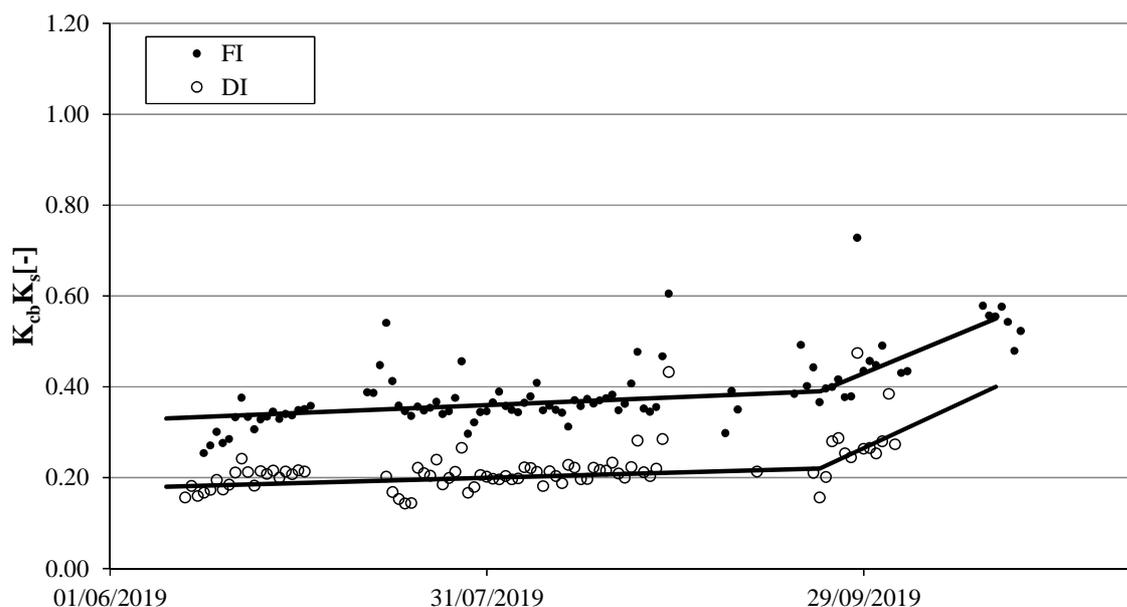


Figura 4.2.34. Andamento temporale del $K_{cb}K_s$, per le due diverse gestioni irrigue FI e DI.

Per entrambe le tesi i valori di $K_{cb}K_s$ ricavati con la metodologia proposta da Do et al., (2018) risultano leggermente inferiori rispetto all'anno precedente soprattutto per quanto riguarda il periodo iniziale. Queste riduzioni possono essere attribuite al parziale danneggiamento della porzione sud della chioma ed si è verificato con eguale intensità in tutte e due le tesi. l'effetto dell'assenza di deficit ha permesso alla tesi FI di compensare con il proseguire della stagione

irrigua eguagliando i valori registrati durante il 2018. Infatti come è possibile evidenziare il $K_{cb}K_s$ tende ad incrementare durante il periodo di applicazione dell'irrigazione ed assume un valore medio di circa 0,37, leggermente inferiore al 2018 (0,40), alla fine del periodo estivo a seguito della riduzione della richiesta traspirativa e dell'incremento della disponibilità idrica dovuta alle precipitazioni i valori di $K_{cb}K_s$ tendono a incrementare fino a circa 0,60. Il danneggiamento della chioma avvenuto in primavera e le differenti condizioni climatiche, influenzando sulle dinamiche di crescita della vegetazione hanno posticipando il momento di incremento dei valori di $K_{cb}K_s$ rispetto al 2018 di circa un mese. La tesi in DI presenta dei valori medi di $K_{cb}K_s$, inferiori al 2018 (0,30), e pari a 0,21, questi valori si mantengono pressoché costanti per tutta la durata del periodo di irrigazione, l'applicazione di uno stress idrico prolungato nel tempo, non ha permesso alla pianta di ripristinare le condizioni della chioma e riportare i valori di $K_{cb}K_s$, agli stessi valori di FI anche in presenza di ottimali condizioni idriche del suolo. Il rapporto tra i valori ottenuti nelle tesi FI e DI rivela una condizione di stress sintetizzata dal coefficiente di stress K_s mediamente pari a 0,57. Il valore minore ottenuto rispetto all'anno 2018 ($K_s = 0,75$), è derivato dalla differente composizione della chioma (danneggiamento porzione sud della chioma, 2019) e differenti condizioni climatiche nei due anni, maggiore $E_{To,d}$ e minori apporti di pioggia estiva nel 2019, che hanno contribuito ad mantenere la pianta in condizioni di deficit per un periodo più prolungato.

L'utilizzo dei sensori nei due anni ha permesso di valutare i valori di $K_{cb}K_s$ che risultano per la tesi in FI circa 0,40 per entrambi gli anni. In FI grazie al costante rifornimento idrico e all'assenza di stress idrico rilevato mediante le misure con la camera di Scholander, è possibile attribuire a $K_s = 1$ (assenza di stress), ottenendo per questa coltura il valore di K_{cb} . I valori ottenuti in questo lavoro risultano essere molto simili a quelli riportati nella tabella 17 della FAO56 relativa agli agrumi, 0,46, considerando una *fraction cover* (f_c) misurata in campo pari a 0,31.

4.3. Valutazione in campo delle performance dei gocciolatori.

Gli impianti subirrigui garantiscono una riduzione dei consumi irrigui, permettendo di ottenere valori elevati di efficienza dell'uso dell'acqua, con valori anche superiori al 90%, ma dati gli elevati costi di investimento iniziali, il sistema diventa economicamente vantaggioso solo se l'efficienza associata è garantita per periodi di 15-20 anni (Lamm et al., 2015; 2017). Quindi il monitoraggio regolare dello stato di funzionamento dell'impianto assume un ruolo decisivo per programmare interventi di manutenzione, per incrementare la vita utile dell'impianto.

La posizione interrata, come è noto, incrementa la possibilità di verificarsi di fenomeni negativi come l'intrusione radicale, o l'ostruzione per fenomeni di aspirazione di particelle di suolo dovuti alla depressione in condotta a seguito dello svuotamento, nonché impedisce la possibilità di ispezione diretta dei gocciolatori e della misura della portata associata al singolo erogatore. La misura diffusa delle portate associate ai gocciolatori oltre che richiedere l'apertura di numerosi profili all'interno del campo, è dispendiosa in termini di tempo ed sicuramente poco praticabile da parte di un normale agricoltore. Per questi motivi, un attento monitoraggio dei volumi erogati e la contestuale misura della pressione di esercizio, è spesso l'unico sistema per valutare l'eventuale riduzione di portate nel tempo a seguito dei fenomeni invecchiamento dei gocciolatori ed eventuali fenomeni di intrusione radicale.

Il presupposto necessario per effettuare un corretto monitoraggio del sistema, oltre ad un adeguata progettazione dell'impianto, è la piena conoscenza degli elementi che caratterizzano il sistema. La caratterizzazione idraulica degli erogatori installati e la migliore stima possibile del numero di gocciolatori presenti in campo sono essenziali per poter stimare correttamente la portata media erogata dal settore e determinare il valore iniziale di funzionamento sul quale basare il valore soglia.

La figura 4.3.1 riporta la relazione tra la pressione di esercizio e la portata erogata dai modelli di gocciolatori installati in campo e il relativo coefficiente di variazione, ottenuti su 25 gocciolatori nuovi secondo la procedura ISO 9261:2010.

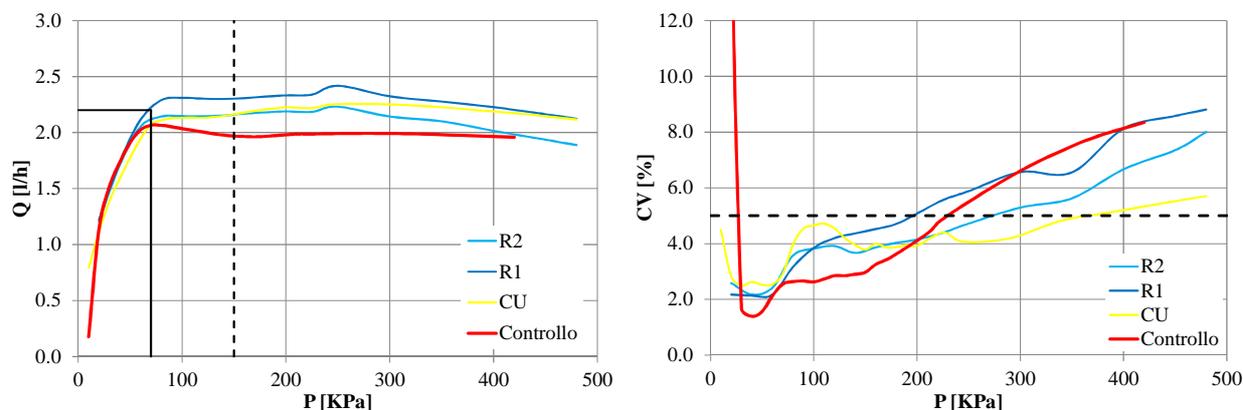


Figura 4.3.1. Relazione tra la pressione di esercizio e la portata erogata ottenuta secondo lo standard ISO 9261:2010 su 25 gocciolatori nuovi, delle ali gocciolanti installate in pieno campo. I valori del coefficiente di variabilità in funzione della portata di esercizio sono inoltre riportati .

Come è possibile osservare dalla figura, i gocciolatori sono del tipo auto-compensanti, con l’inizio delle funzioni di auto-compenso a pressioni di circa 70 kPa. Alla pressione di esercizio in campo 150 kPa i gocciolatori Multibar C in cui sono presenti i vari principi attivi anti-radice presentano una variazione di portata contenuta tra 2.2 e 2.3 l/h, mentre il modello Multibar F presenta una portata di 2,1 l/h. Il CV tecnologico (Bralts et al., 1981a) per tutti gli erogatori, nell’intervallo di funzionamento risulta inferiore al 5 %, valore ritenuto ottimale secondo la norma ISO 9261. Per valori superiori a 150 kPa il CV tende ad aumentare fino a valori intorno a 8% in corrispondenza del valore massimo raggiunto dalla prova 480 kPa.

La figura 4.3.2. mostra la relazione tra le perdite di carico e la lunghezza dei gocciolatori . Per i modelli considerati le perdite di carico associate alla lunghezza massima delle ali gocciolanti in campo (50 m) si mantengono al di sotto di 0,1 m. Considerando gli aspetti congiunti della funzionalità auto-compensante dei gocciolatori, della chiusura ad anello del circuito idraulico dell’impianto irriguo, e del limitato numero di gocciolatori per settore, le perdite di carico associate alle varie condotte possono essere considerate poco influenti sugli aspetti dell’uniformità di erogazione dei gocciolatori.

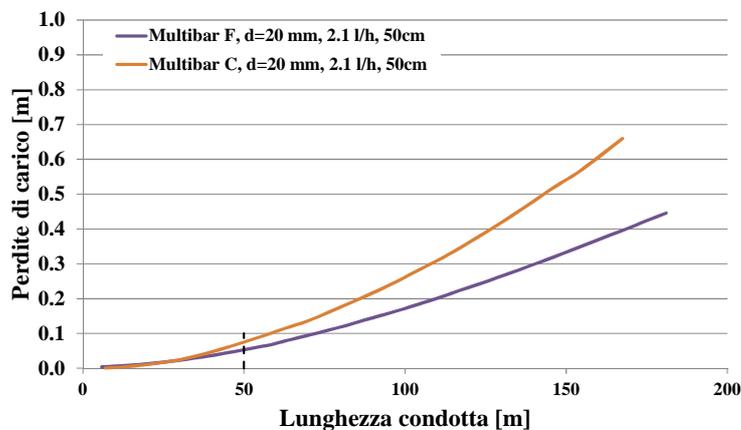


Figura 4.3.2. Relazione tra perdite di carico e lunghezza della condotta per i due differenti modelli di ali gocciolanti installate in campo. La linea tratteggiata individua la lunghezza massima delle condotte in campo.

La tabella 4.3.1 riporta il numero di piante per settore, la lunghezza totale delle ali gocciolanti installate e il numero di gocciolatori presenti in campo, stimati considerando il sesto di impianto (5m per 5m) e misurati in campo. La differenza percentuale tra il numero di gocciolatori stimati considerando solamente il sesto di impianto e quelli effettivamente misurati è inoltre riportata. La stima del numero di gocciolatori porta ad attribuire al settore un numero maggiore di gocciolatori tra il 3,5 % e il 9,7 % con considerevoli ripercussioni sul calcolo della portata media dei gocciolatori.

Tabella 4.3.1. Numero di piante per settore (P), lunghezza totale delle ali gocciolanti installate (L) e numero di gocciolatori (G), stimati considerando il sesto di impianto e misurati in campo. La differenza tra il valore stimato e misurato dei gocciolatori è inoltre riportato (ΔG)

TESI	P	Stimati		Misurati		ΔG [%]
		L [m]	G [N°]	L [m]	G [N°]	
FI 1	45	450	900	430	860	4,65
FI 2	35	350	700	338	676	3,55
FI 3	32	320	640	305	610	4,92
FI 4	39	390	780	364	728	7,14
DI 1	44	440	880	401	802	9,73
DI 2	32	320	640	304	608	5,26
DI 3	32	320	640	298	596	7,38
DI 4	36	360	720	338	676	6,51

La figura 4.3.3. mostra gli andamenti durante le due annate irrigue delle pressioni misurate all'ingresso dei vari settori irrigui. Durante il primo anno e per tutte le tesi si è assistito ad una

oscillazione di 10 kPa intorno al valore di regolazione iniziale dell'impianto 150 kPa, mentre durante il secondo la pressione ha subito un progressivo incremento fino a valori prossimi o superiori a 175 kPa per entrambe le tesi irrigue FI e DI, e per i diversi principi attivi anti-radice utilizzati. Data la particolare attenzione dedicata alla manutenzione del sistema di filtraggio l'aumento della pressione potrebbe essere attribuito ad una progressiva perdita di funzionalità dei gocciolatori che a parità di condizioni idrauliche porterebbe ad un incremento della pressione di esercizio. Tale aumento di pressione, essendo i gocciolatori auto-compensanti, influenza in modo minimo la portata media erogata in campo.

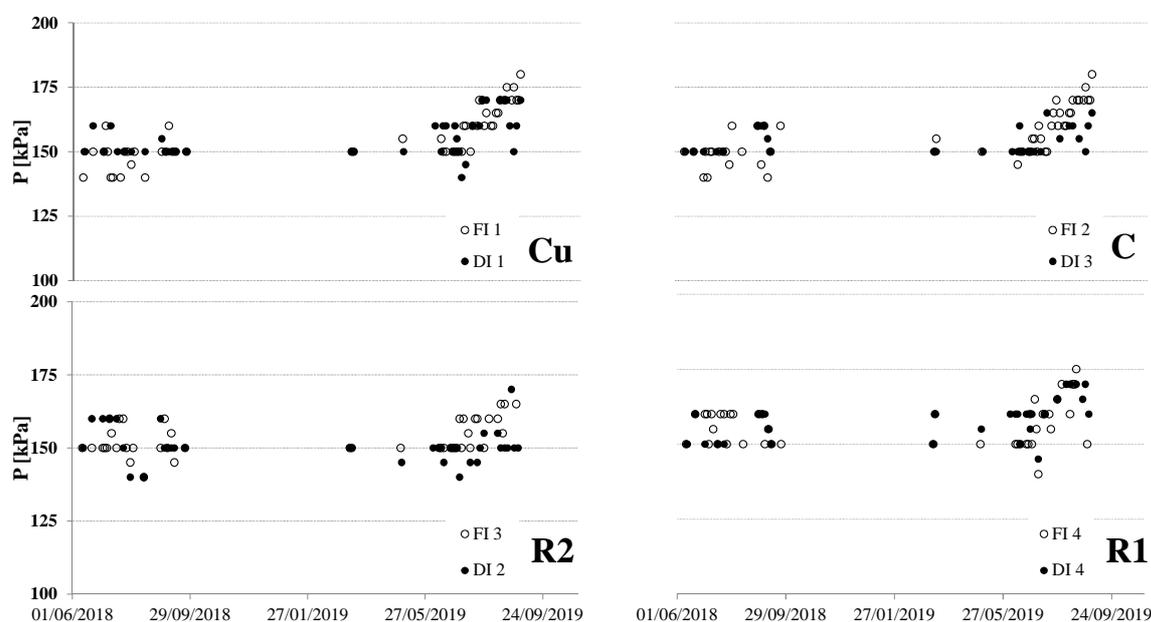


Figura 4.3.3. Pressione all'ingresso del settore irriguo durante il periodo di studio. Per ogni principio attivo anti-radice utilizzato (CU, R1 e R2) e il controllo (C) sono riportati i dati della tesi gestita in irrigazione deficitaria (DI) e in piena irrigazione (FI).

L'andamento della portata media dei gocciolatori nei diversi trattamenti, è riportata nella figura 4.3.4. Come è possibile valutare per ogni principio attivo installato la tesi in deficit (DI) presenta un numero inferiore di ore di funzionamento, a conseguenza della riduzione dei volumi irrigui applicati tra luglio e agosto nelle due stagioni irrigue. In tutte le tesi vi è una certa sovrapposizione tra DI ed FI, eccetto il controllo (C) che manifesta una portata oraria nettamente maggiore. Quest'effetto è dovuto a delle perdite causate da alcune lesioni alla tubazione generate

nella fase di installazione. Queste perdite, di difficile rilevamento hanno comportato un incremento dei volumi erogati e conseguentemente a parità di gocciolatori l'incremento della loro portata media.

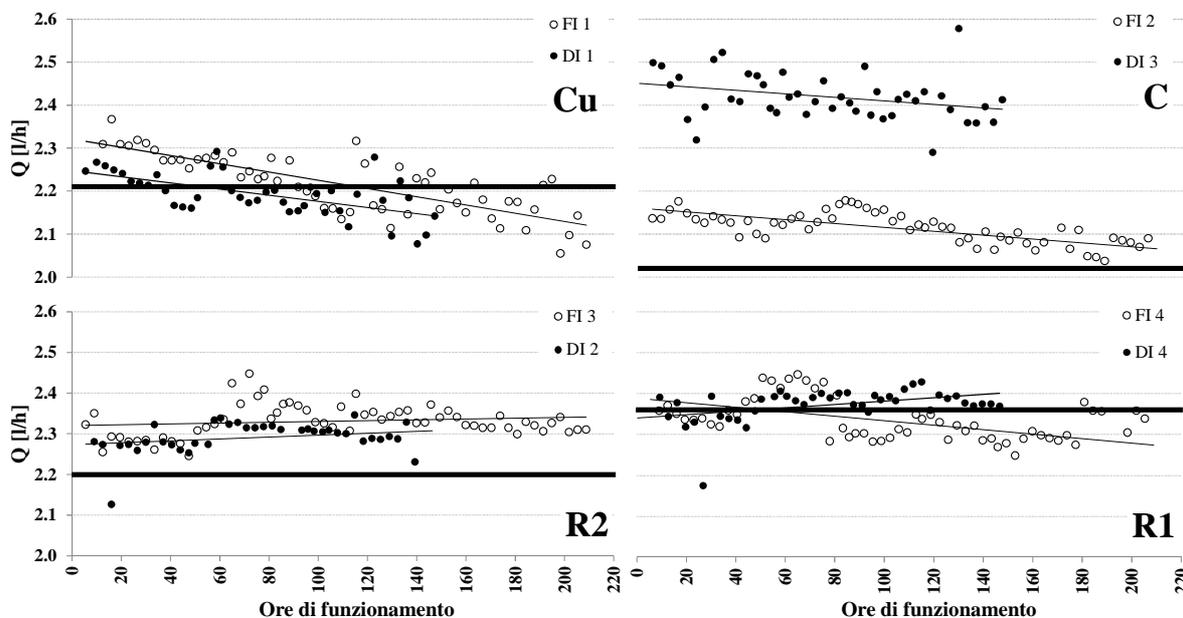


Figura 4.3.4. Portata media dei gocciolatori in funzione delle ore di funzionamento. Per ogni principio attivo anti-radice utilizzato (CU, R1 e R2) e il controllo (C) sono riportati i dati della tesi gestita in irrigazione deficitaria (DI) e in piena irrigazione (FI). Le linee nere spesse indicano le portate medie, dei gocciolatori nuovi ottenute secondo la norma ISO 9261:2010 alla pressione di 150 kPa.

E possibile notare un trend di riduzione delle portate erogate per le tesi C e Cu, mentre questo effetto è limitato nella tesi R1 al trattamento in FI e assente nel trattamento DI. In R2, al netto di piccole oscillazioni, i valori della portata si mantengono costanti durante il periodo. La riduzione della portata riscontrata seppur con effetti più lievi segue i risultati delle prove in vaso dell'efficacia protettiva dei vari principi attivi anti-radice. Infatti l'assenza di una riduzione della portata nella tesi R1, ci porta a supporre che l'effetto protettivo manifestato in vaso possa essere il medesimo anche in campo. Infatti rispetto alle altre tesi, in cui già dopo due anni di funzionamento è possibile riscontrare il fenomeno dell'intrusione radicale, nella tesi R1 questo fenomeno è stato ridotto notevolmente. Per avere contezza dell'effetto sul lungo periodo dell'efficacia dei vari principi attivi anti intrusione radicale non sono state effettuati prelievi delle ali gocciolanti, ne tantomeno ripristinate le parti danneggiate individuate nella tesi DI3 per non alterare le condizioni di campo.

Appendice: Confronto di diversi metodi di stima della densità di flusso.

L'implementazione del sistema di acquisizione e trasmissione dei dati, ottenuti mediante le sonde a dissipazione termica per la misura del *sap-flow*, ha permesso di utilizzare un protocollo volto al risparmio energetico con cicli di 10 minuti di riscaldamento e 10 di raffreddamento con misura della temperatura ogni 5 secondi. Il protocollo adottato ha permesso di applicare, partendo dagli stessi dati, diversi modelli per la stima della densità di flusso: il primo metodo di calcolo proposto da Lubczynski et al. (2012), si basa sulla formulazione empirica ricavata da Granier (1985), ed utilizza i dati ottenuti mediante l'alternanza di cicli con riscaldatore acceso (ON) e con riscaldatore spento (OFF) per tenere in considerazione l'influenza dei gradienti termici naturali (NTG (Natural Thermal Gradients)). Questo metodo utilizza, per il calcolo del coefficiente termico, K_L , i risultati ottenuti mediante l'individuazione della fase stazionaria, alla fine dei cicli, in modo da poter soddisfare le condizioni di equilibrio necessarie per l'applicazione del metodo Granier (1985); il secondo metodo è basato sui lavori di Do and Rocheteau (2002a, 2002b) e segue il successivo sviluppo proposto da Isarangkool Na Ayutthaya et al. (2010), in cui gli autori considerano il transiente termico che si genera tra i due cicli di riscaldamento (h) e raffreddamento (c), utilizzando in analogia alla formulazione Granier per il calcolo della densità di flusso, u , un indice termico K moltiplicato per un coefficiente empirico; il terzo tiene in considerazione gli avanzamenti del metodo di Isarangkool Na Ayutthaya et al. (2010) proposto da Do et al. (2018), che propongono un nuovo indice termico, K_2 , e un nuovo coefficiente per il calcolo della densità di flusso. Il quarto segue la formulazione originale di Granier utilizzando solamente i valori ottenuti alla fine del ciclo di riscaldamento, ipotizzando che siano raggiunte le condizioni di stazionarietà richieste dal metodo. Le varie metodologie di misura e la simbologia associata sono descritte in modo più dettagliato al paragrafo 3.2.

La tabella A.1 indica i principali parametri utilizzati dalle differenti metodologie di stima della densità di flusso che si sono sviluppati partendo dalla formulazione originaria di Granier (1985), dove ΔT , è la differenza di temperatura registrata dal sensore tra le due sonde infisse nell'albero; ΔT_{\max} rappresenta il valore di differenza di temperatura in condizioni di assenza di flusso; ΔT_{ON}^C è la differenza di temperatura corretta dal gradiente termico naturale alla fine del ciclo di riscaldamento; ΔT_{ON}^E è la differenza di temperatura estrapolata dalla fase stazionaria del

ciclo di riscaldamento; ΔT_{OFF}^E è la differenza di temperatura estrapolata dalla fase stazionaria del ciclo di raffreddamento; $\Delta T_{ON\ max}^C$ è la differenza di temperatura corretta dal gradiente termico naturale alla fine del ciclo di riscaldamento in condizioni di assenza di flusso; dT è il transiente termico del segnale; ΔT_c è la differenza di temperatura alla fine del ciclo di raffreddamento; ΔT_h è la differenza di temperatura alla fine del ciclo di riscaldamento; dT_o e dT_u sono rispettivamente il transiente termico in assenza di flusso e quello attuale.

Tabella. A.1. Sintesi dei parametri e delle principali equazioni utilizzate nei diversi metodi di stima della densità di flusso, u , applicati agli stessi dati. Per ogni metodologia sono riportate le equazioni per il calcolo dei vari coefficienti termici (K , K_L , K_2) e quelle relative al calcolo della densità di flusso, u .

Metodo	Equazioni		Densità di flusso	
Granier 1985	ΔT	$K = \frac{\Delta T_{max} - \Delta T}{\Delta T}$	$u = 0,0119 K^{1,231} 3600$ [cm/h]	$u = 0,714 K^{1,231}$ [cm/min]
Ayutthaya et al. 2010	$dT = \Delta T_h - \Delta T_c$	$K = \frac{dT_o - dT_u}{dT_u}$	$u = 12,95 K$ [dm/h]	$u = 2,158 K$ [cm/min]
Lubczynski et al. 2012	$\Delta T_{ON}^C = \Delta T_{ON}^E - \Delta T_{NTG}^E$	$K_L = \frac{\Delta T_{ON\ max}^C - \Delta T_{ON}^C}{\Delta T_{ON}^C}$	$u = 0,0119 K_L^{1,231} 3600$ [cm/h]	$u = 0,714 K_L^{1,231}$ [cm/min]
Do et al. 2018	$dT = \Delta T_h - \Delta T_c$	$K_2 = \frac{dT_o - dT_u}{dT_o}$	$u = 6,42 K_2$ [dm/h]	$u = 1,07 K_2$ [cm/min]

Come si evince dalle formulazioni, concettualmente i metodi sono molto simili e si basano sul calcolo di un indice termico, come proposto inizialmente da Granier (1985).

Questo viene modificato dai diversi autori per tenere conto i) del transiente termico che si verifica tra due cicli di riscaldamento e raffreddamento, utilizzando come riferimento il valore del transiente registrato in condizioni di assenza di flusso (Isarangkool Na Ayutthaya et al., 2010; Do et al., 2018); ii) del raggiungimento della fase stazionaria durante i cicli di raffreddamento e riscaldamento e dell'influenza del gradiente termico naturale, utilizzando come riferimento il valore della differenza di temperatura corretta dal gradiente termico registrata in condizioni di assenza di flusso, ottenuta mediante regressione non-lineare delle equazioni esponenziali proposte da Lubczynski et al. (2012, eq. 17, 18, 19, 20)

Per applicare la procedura di Lubczynski et al. (2012), sono necessarie acquisizioni con intervalli molto ravvicinati, tra i 5 e i 30 secondi, per poter permettere di apprezzare le dinamiche di raffreddamento e riscaldamento che subiscono rapide variazioni nei primi minuti dall'inizio

del ciclo. Questo quantitativo così elevato di dati risulta necessario per procedere alla stima dei parametri A1, A2, A3, T1, T2 e T3 di Lubczynski et al. (2012), per l'individuazione della fase stazionaria. Poiché le sonde utilizzate nell'installazione sperimentale sono della stessa natura di quelle utilizzate da Lubczynski et al. (2012), sono stati utilizzati, per i parametri T1 e T2, i valori proposti dagli autori che a seguito di una analisi preliminare di sensibilità dei dati, sono risultati essere poco sensibili a variazioni e quindi fissati rispettivamente a 12 s e 80 s. Gli altri quattro parametri, A1, A2, A3 e T3 sono stati ricavati tramite una routine che ottimizza i risultati, secondo il metodo dei minimi quadrati.

La tabella A.2 riporta il numero delle stime, ottenute per regressione non-lineare, dei parametri A1, A2, A3 e T3, distinguendo i cicli per i quali la procedura di regressione ha condotto all'individuazione di una soluzione (*Fit*) da quelli per i quali non è stato possibile individuare una soluzione (*No Fit*). I risultati sono riportati separatamente considerando il momento della giornata in cui è avvenuto il ciclo per tenere in conto l'influenza della presenza (Giorno) e l'assenza (Notte) di flussi traspirativi e della contestuale presenza del riscaldatore acceso (ON) o spento (OFF).

Tabella. A2. Numero di stime dei parametri A1, A2, A3 e T3, eseguite seguendo la procedura di Lubczynski et al., 2012, con individuazione di una soluzione (*Fit*), e senza individuazione di una soluzione (*No Fit*) e percentuale delle stime con soluzione (*Fit%*) sul totale delle stime eseguite. I dati sono separati per tenere in conto il periodo del giorno (Giorno; Notte) ed il ciclo con riscaldatore acceso (ON) o spento (OFF).

	Giorno		Notte	
	ON	OFF	ON	OFF
<i>Fit</i> [n°]	3444	2167	2524	2526
<i>No Fit</i> [n°]	17	1294	2	0
Tot [n°]	3461	3461	2526	2526
<i>Fit%</i> [%]	99,5%	62,6%	99,9%	100,0%

Come si evince dai dati, la percentuale di successo della stima dei parametri è pressoché totale (> 99,5%), tranne per i cicli che si verificano durante il giorno ed in assenza di riscaldamento (62,6 %). Tale fenomeno può essere in parte attribuito alla presenza durante il giorno di flussi traspirativi che dissipano più velocemente l'energia somministrata al sistema mediante il riscaldatore e portano i valori di ΔT a valori prossimi 0,0°C che rappresenta il limite fisico inferiore del *range* di misura del sensore. Infatti, la progettazione del sensore, che è stata mirata al massimo risparmio energetico ed l'abbattimento dei costi di realizzazione, non permette

di rilevare eventuali gradienti negativi che possono verificarsi durante il giorno. Come riportato nella figura A.1, che presenta degli esempi di misure effettuate durante il giorno e la notte, e con l'elemento riscaldante acceso (ON) e spento (OFF), l'aumento o il decremento della temperatura può essere separato in tre fasi: una rapida risposta cinetica fino a circa 30 s, una fase di transizione fino a 180-200 s e una lenta fase asintotica. La differenza nelle risposte tra il giorno e la notte, e tra la presenza di riscaldatore acceso o spento sono causate dalla presenza di condizioni di flusso differenti. Risulta evidente la dinamica che si verifica durante il ciclo OFF durante il giorno, periodo in cui la presenza di flussi linfatici porta ad una rapida dissipazione del calore accumulato durante la fase di riscaldamento ed alla conseguente diminuzione del ΔT .

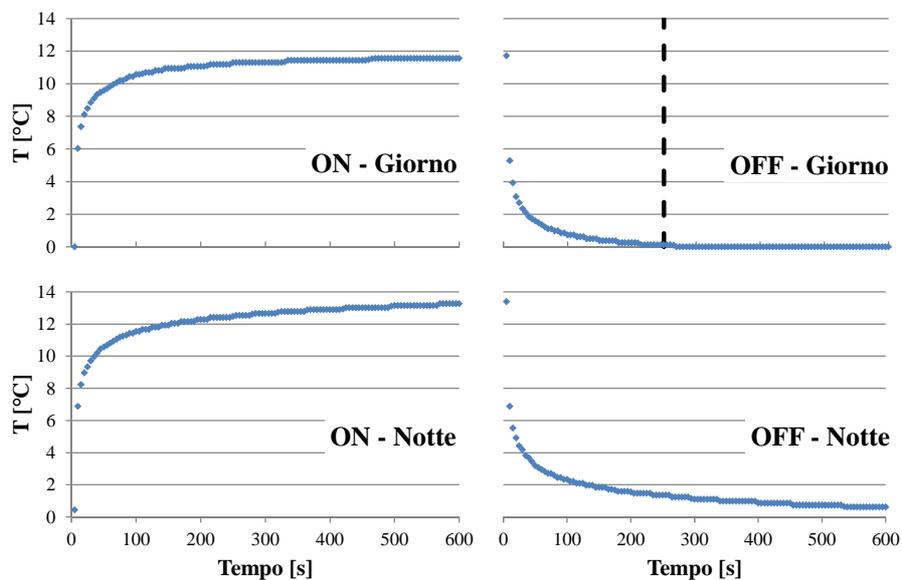


Figura A.1. Andamento temporale di ΔT misurato durante i cicli di riscaldamento (ON) e raffreddamento (OFF), separati in considerazione della presenza (Giorno) o assenza di flusso (Notte).

In questo caso il valore di temperatura raggiunge il valore di $0,0^{\circ}\text{C}$ (nessuna differenza di temperature, tra le due sonde) dopo circa 250 s, molto prima della fine del ciclo delle misure. Data la menzionata limitazione costruttiva del sensore, non è possibile riscontrare eventuali effetti di un possibile gradiente termico negativo, che potrebbe verificarsi durante la restante parte del ciclo.

La tabella A.3 riporta la media e la deviazione standard dei parametri adottati nell'equazione per la stima della fase stazionaria dei cicli di riscaldamento (ON) e

raffreddamento (OFF), separati in considerazione della presenza (Giorno) o assenza di flusso (Notte).

Il parametro A1 assume valori pressoché stabili durante il periodo di osservazione, così come osservato da Lubczynski et al. (2012), tale parametro rappresenta una componente stabile del sistema (elemento riscaldante) e subisce poco l'influenza della dissipazione del calore convettivo.

Tabella A.3. Media e deviazione standard dei valori assunti dai parametri A1, A2, A3, T1, T2 e T3, adottati nell'equazione per la stima della fase stazionaria dei cicli di riscaldamento (ON) e raffreddamento (OFF), separati in considerazione della presenza (Giorno) o assenza di flusso (Notte).

Parametri	Giorno				Notte			
	ON		OFF		ON		OFF	
	μ	δ	μ	δ	μ	δ	μ	δ
A1 [°C]	8.66	0.23	8.99	0.25	8.87	0.22	8.94	0.21
A2 [°C]	2.03	0.42	1.07	0.94	2.11	0.12	2.03	0.13
A3 [°C]	1.21	0.54	2.09	0.44	2.07	0.15	2.00	0.13
T1 [s]	12.0		12.0		12.0		12.0	
T2 [s]	80.0		80.0		80.0		80.0	
T3 [s]	351.5	150.1	235.9	146.2	443.6	60.6	418.9	62.2

Per quanto riguarda i parametri A2 e A3, che rappresentano rispettivamente il sistema termico composto dal tubo di alluminio e quello relativo al legno conduttivo, è possibile osservare una maggiore variabilità durante il giorno rispetto la notte a seguito dell'influenza dell'effetto delle variazioni delle condizioni di flusso che si verificano all'interno della giornata e durante il periodo di osservazione. Anche il parametro T3 che è la costante temporale ed rappresenta circa il 68% del tempo necessario al raggiungimento della fase stazionaria risulta molto influenzato dalla dinamica giornaliera dei flussi, infatti durante il giorno presenta maggiore variabilità, e valori minori. I valori minori sono dovuti ad una maggiore dissipazione termica che si verifica durante il giorno, ed è funzione dell'equilibrio dinamico tra l'apporto di calore, tramite l'elemento riscaldante, e il calore dissipato dal flusso linfatico. Contrariamente durante la notte il tempo di raggiungimento dell'equilibrio risulta essere maggiore poiché la dissipazione termica dovuta al flusso risulta essere minima o assente.

La figura A.2 riporta l'andamento temporale dei valori di ΔT registrati alla fine del ciclo di raffreddamento (OFF) e i valori estrapolati seguendo la procedura proposta da Lubczynski et al. (2012).

I valori letti dal sensore alla fine del ciclo di raffreddamento presentano dei valori prossimi a 0,0°C durante il giorno per poi incrementare fino a circa 1°C durante la notte, dove l'assenza di flusso e la durata del ciclo non permettono il restaurarsi della condizione di equilibrio termico dei due sensori ($\Delta T = 0$).

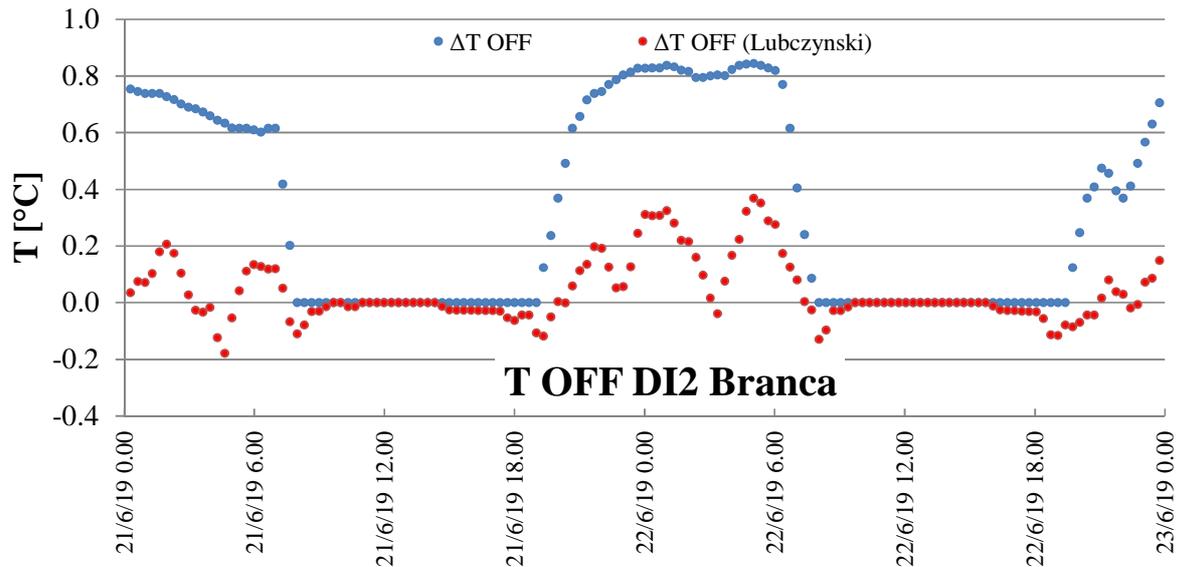


Figura A.2 Andamento temporale di ΔT registrato alla fine della fase del ciclo con riscaldatore spento (OFF) ed relativo valore estrapolato secondo la procedura proposta da Lubczynski et al., 2012.

Similmente durante il giorno i valori di ΔT OFF (Lubczynski) tendono ad assumere il valore di 0,0°C, con piccoli gradienti termici rilevati all'inizio ed alla fine del giorno, seguendo questo andamento è possibile supporre che i dati mancanti durante il giorno siano prossimi a valore di 0,0°C. Confrontando i dati rilevati durante i periodi di transizione della giornata, alba e tramonto, in cui i gradienti termici naturali sono maggiori, è possibile notare che i valori di ΔT OFF (Lubczynski) risultano comunque essere piuttosto contenuti (da -0,2 a +0,4 °C) denotando un buon isolamento termico realizzato a protezione dei sensori.

La figura A.3 riporta l'andamento temporale dei valori di ΔT registrati alla fine del ciclo di riscaldamento (ON) e i valori estrapolati seguendo la procedura proposta da Lubczynski et al. (2012). È possibile osservare una sovrapposizione dei valori durante il giorno tra ΔT e ΔT ON (Lubczynski) mentre durante il periodo notturno si rileva una differenza di circa +0,5 °C. Anche

in questo caso l'insufficienza della durata del ciclo notturno comporta il mancato raggiungimento delle condizioni di equilibrio.

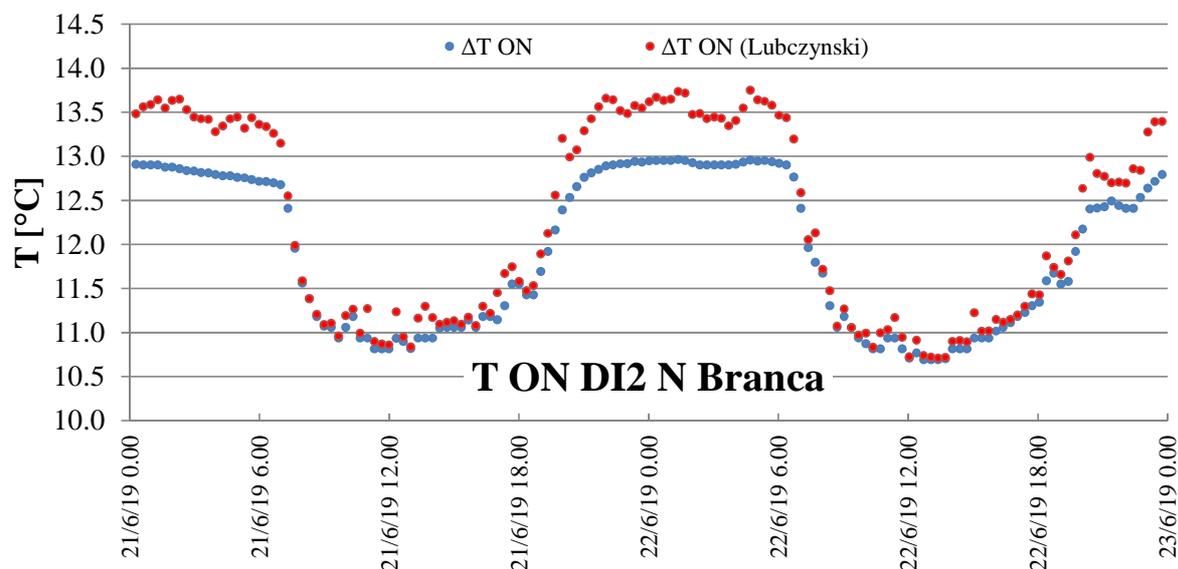


Figura A.3. Andamento temporale di ΔT registrato alla fine della fase del ciclo con riscaldatore acceso (ON) ed relativo valore estrapolato secondo la procedura proposta da Lubczynski et al., 2012.

La figura A.4 riporta la frequenza dei valori del gradiente termico naturale (NTG) misurato durante i cicli con riscaldatore spento (OFF) durante il giorno e la notte. Per l'intero periodo di osservazione, il gradiente termico naturale risulta essere contenuto tra $-0,2$ e $+0,4$ °C ciò risulta nettamente inferiore a quelli registrati da Lubczynski et al. (2012), su alberi isolati e senza schermatura completa dei sensori e del tronco, con valori che vanno da $-5,2$ a $+0,98$ °C.

I valori della media e della deviazione standard del gradiente termico naturale, risultano rispettivamente $0,08$ e $0,11$ °C per il giorno e $0,05$ e $0,11$ °C per la notte. I ridotti NTG, a seguito del buon isolamento termico hanno delle ripercussioni minime sulla stima della densità di flusso con errori massimi nell'ordine del 10% durante il periodi di transizione del giorno, alba e tramonto.

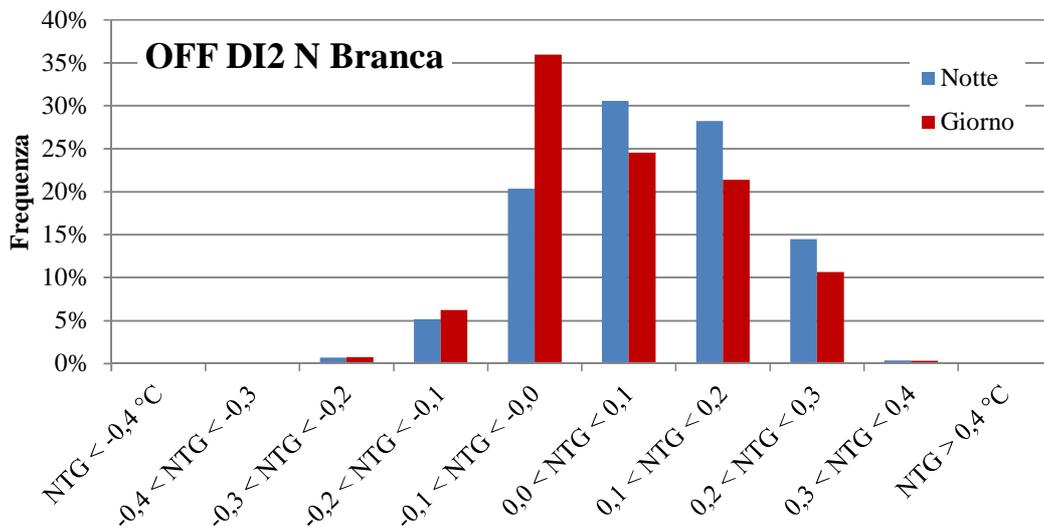


Figura A.4. Frequenza percentuale dei valori del gradiente termico naturale (NTG) misurati durante il ciclo con riscaldatore spento (OFF) secondo la procedura proposta da Lubczynski et al., 2012, durante il giorno e la notte.

I metodi di stima dei flussi che si basano sul transiente termico utilizzati da Isarangkool Na Ayutthaya et al. (2010) e Do et al. (2018), a differenza della metodologia proposta da Lubczynski et al. (2012), non necessitano di applicare nessuna correzione (individuazione della fase stazionaria del ciclo) sui dati misurati dalle sonde, utilizzando per il calcolo gli ultimi valori dei cicli di riscaldamento e raffreddamento. Questa riduzione significativa dei dati registrati, ed eventualmente trasmessi semplifica la successiva elaborazione, nonché migliora la comunicazione tra diversi dispositivi riducendo il numero di pacchetti inviati e il rispettivo volume di dati, incrementando l'intervallo di invio del pacchetto (alla fine del ciclo).

La figura A.5 riporta, a titolo di esempio l'andamento giornaliero della densità di flusso, u , stimata a partire dagli stessi dati, e con le metodologie di calcolo proposte da: Granier, 1985; Isarangkool Na Ayutthaya et al., 2010; Lubczynski et al., 2012; Do et al., 2018.

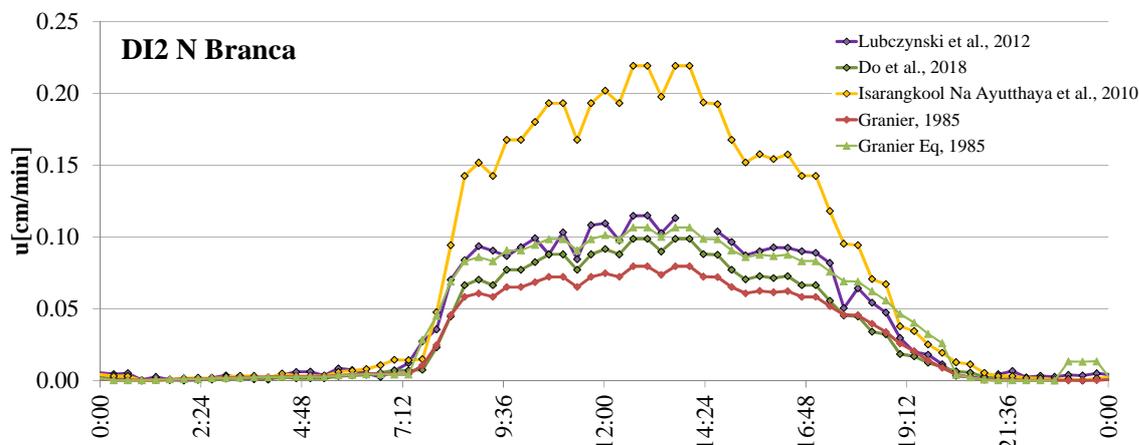


Figura A5. Andamento giornaliero della densità di flusso, u , stimata a partire dagli stesso data set, con le metodologie proposte da: Granier, 1985; Isarangkool Na Ayutthaya et al., 2010; Lubczynski et al., 2012; Do et al., 2018.

Dall'analisi della figura emerge chiaramente che il metodo di calcolo proposto da Isarangkool Na Ayutthaya et al.(2010), tende ad assumere valori doppi rispetto agli altri metodi. Questo metodo nel tempo è stato perfezionato da Do et al. (2018) migliorando le performance del modello, partendo dalla stessa base di dati, utilizzando un nuovo indice termico e un nuovo coefficiente per il calcolo dei flussi.

Le differenze riscontrate tra i modelli di Lubczynski et al. (2012), e Do et al. (2018) risultano essere contenute nell'ordine del 10%, con valori che si discostano maggiormente durante le prime e le ultime ore del giorno, tendendo a convergere per i valori notturni del flusso. Le misure ottenute applicando Granier (1985), si presentano circa 20% inferiori rispetto a Do et al. (2018) e del 30% rispetto a Lubczynski et al. (2012). Questa riduzione può essere attribuita al non raggiungimento di un equilibrio termico adeguato, durante la fase di riscaldamento che porta soprattutto durante i cicli notturni ad una sottostima del ΔT di circa $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ così come emerge dal grafico A.3.

Ipotizzando il raggiungimento delle condizioni di equilibrio e l'utilizzo delle equazioni di Granier (Granier Eq, 1985), è possibile notare un drastica riduzione delle differenze tra i metodi. Infatti, i valori per questo metodo si ritrovano esattamente in una posizione intermedia rispetto agli altri due metodi.

La trasformazione dei dati da densità di flusso, u [cm/min], stimati mediante i differenti metodi, a traspirazione effettiva della coltura, $T_{c_{act}}$ [mm/d] ha tenuto in considerazione la dimensione delle branche della pianta monitorata.

La figura A.6 riporta l'andamento temporale durante il periodo di osservazione traspirazione effettiva della coltura, $T_{c_{act}}$, calcolata secondo le metodologie proposte da Granier (1985), Lubczynski et al. (2012) e Do et al. (2018), utilizzando i dati registrati nella tesi DI2 N Branca. I valori di traspirazione effettiva della coltura, $T_{c_{act}}$, riportati nel grafico rappresentano la traspirazione di circa metà pianta (Branca Nord) con l'influenza dell'applicazione dell'irrigazione deficitaria (DI). Confrontando i vari metodi è possibile notare che Granier (1985) presenta valori costantemente più bassi, per tutto il periodo di osservazione per effetto della sottostima dei ΔT notturni, come espresso in precedenza. Mentre le differenze riscontrate tra Lubczynski et al. (2012) e Do et al. (2018) sono maggiori nel periodo iniziale mentre tendono ridursi nel restante periodo.

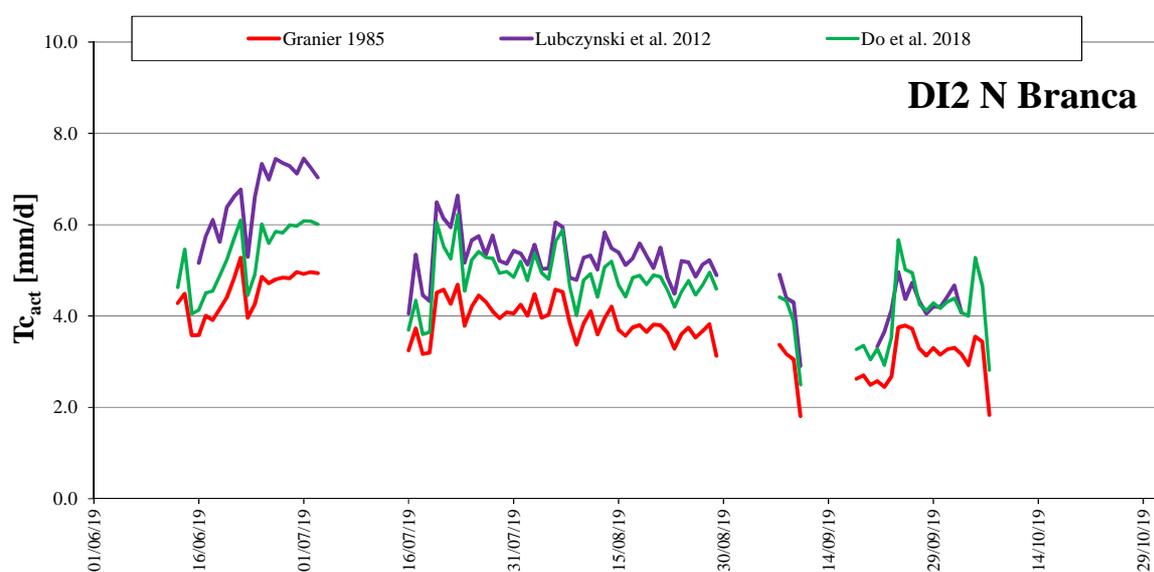


Figura A.6. Andamento temporale della traspirazione effettiva della branca, $T_{c_{act}}$, calcolato secondo le metodologie proposte da Granier (1985), Lubczynski et al. (2012) e Do et al. (2018), utilizzando i dati registrati nella tesi DI2 N Branca.

Da questi risultati emerge che, il metodo proposto da Lubczynski et al. (2012) si presta a correggere i possibili errori associati ai gradienti termici naturali, ma per la sua esecuzione

necessita una mole elevata di dati da trasmettere ed registrare. Contrariamente, per gli altri metodi il numero di informazioni per la stima dei flussi sono riconducibili a pochi valori, ottenuti alla fine dei cicli di riscaldamento e raffreddamento (Do et al., 2018) o solo di riscaldamento (Granier, 1985), ciò semplifica la raccolta, l'invio e l'elaborazione dei dati. Per contro, l'applicazione del metodo di Lubczynski et al. (2012), tenendo in considerazione nei calcoli il raggiungimento della fase stazionaria durante i cicli (così come richiesto dalla formulazione originaria di Granier 1985) e l'effetto del gradiente termico naturale, risulta essere più generalizzabile rispetto agli altri metodi.

Il sistema di sensori messo a punto permette l'applicazione di diverse metodologie di stima dei flussi linfatici, ma necessita di una implementazione hardware della parte di amplificazione del segnale per registrare anche i possibili gradienti negativi che si possono instaurare durante il giorno. Un ulteriore possibile sviluppo del sistema software, con l'implementazione *in situ*, al livello del microcontroller del sensore, delle equazioni proposte da Lubczynski et al. (2012) per la stima del valore di temperatura della fase stazionaria mediante regressione non-lineare, ridurrebbe drasticamente il volume di dati inviati, con un vantaggio complessivo per il sistema ed un modesto utilizzo della banda radio, che si renderebbe disponibile per un maggiore numero di sensori. Infine, ulteriori ricerche finalizzate alla stima della fase stazionaria ed alla individuazione della durata ottimale dei cicli di riscaldamento e raffreddamento, potrebbero condurre allo sviluppo di metodologie semplificate di stima della fase stazionaria e permettere, conseguentemente, l'estensione dell'applicazione del metodo originario di Granier (1985) con adeguate correzioni per i gradienti termici naturali, stimati direttamente *in situ*, anche a sistemi e microcontroller con minore disponibilità di risorse e minori esigenze energetiche di quello adottato nel presente studio. Quest'ultima possibilità è altamente desiderabile in uno scenario di precision farming, in quanto potrebbe consentire un'applicazione su larga scala delle metodologie di stima dei flussi xilematici delle piante arboree.

Conclusioni

Nel presente studio sono state affrontate alcune problematiche relative agli impianti in subirrigazione, al fine di valutarne l'utilizzabilità per le colture agrumicole. E' stata in particolare valutata, con prove in vaso e di pieno campo, l'efficacia di cinque principi attivi anti intrusione radicale e, nello specifico, il Rame (Cu), la Cianammide in due distinte concentrazioni CY1 (1,25%), CY2 (2,50%), oltre a due diversi erbicidi, il Trifluralin (R1) ed il Preventol® (R2), al fine di identificarne gli effetti sulla crescita dell'apparato radicale e aereo di un comune portinnesto di agrumi (*citrange* "Carrizo").

Il monitoraggio dell'apparato radicale, in vaso, è stato effettuato utilizzando il minirizotrone messo a punto per lo scopo e che ha permesso di valutare qualitativamente gli effetti dei vari principi attivi anti-radice sullo sviluppo delle radici nell'intorno del gocciolatore. Tra i diversi modelli esaminati, gli erogatori contenenti principi attivi allelopatici quali la cianammide o erbicidi come il Preventol, sono risultati quelli più efficaci ad impedire o rallentare la crescita delle radici in prossimità dei gocciolatori. La formazione di nuove strutture vegetative e radicali non è stata influenzata, nel complesso, dalla presenza dei vari principi attivi, se non limitatamente all'intorno del gocciolatore, così come emerso nelle analisi effettuate con il minirizotrone; inoltre, l'analisi del biomassa radicale e vegetativa della pianta, ha confermato che gli effetti dei vari principi attivi anti-intrusione radicale, sulla crescita delle piante, sono piuttosto limitati o assenti.

Dopo due anni di utilizzo dell'impianto i gocciolatori hanno manifestato una generale riduzione della portata a seguito dei fenomeni congiunti di invecchiamento e di intrusione radicale. Sono state in particolare valutate riduzioni medie di portata variabili tra il 2,4% per gli erogatori contenenti rame a valori superiori al 10% per gli erogatori installati nella tesi di controllo e per quelli contenenti la concentrazione minore di cianamide (CY1). Per tutti gli altri gocciolatori si sono verificate riduzioni medie di portata contenute al di sotto del 6%, e modesti incrementi del coefficiente di variabilità. L'intrusione delle radici ha influenzato, in alcuni casi, le relazioni portata-pressione sebbene per alcuni gocciolatori (Cu e R2), nonostante si sia riscontrata la presenza di radici all'interno del labirinto di passaggio dell'acqua, le variazioni di portata sono

risultate assenti o del tutto trascurabili. In taluni casi (tesi C_[R1] e R2) è stato riscontrato un aumento delle portate erogate, indipendente dall'intrusione radicale.

In generale, è stato osservato che, nonostante la presenza delle radici, i gocciolatori non hanno perso la loro capacità di autocompensazione e neppure la loro funzionalità, anche se per tutti i modelli esaminati è stato riscontrato un incremento della variabilità delle portate erogate. Soltanto in due casi, sull'intero set di gocciolatori esaminati, le radici hanno provocato l'occlusione severa, con riduzioni drastiche delle portate erogate. Sulla base di tali osservazioni si ritiene che, oltre alla presenza di principi attivi anti-radice all'interno dell'erogatore, la forma del labirinto assume un ruolo chiave ai fini della suscettibilità all'occlusione radicale.

L'analisi della risposta dei sensori, contestuale all'esame delle curve granulometriche e delle particelle minerali che compongono il suolo, ha permesso di spiegare, seppur parzialmente, le differenze riscontrate della misura del contenuto idrico da parte dei differenti sensori installati. Dal confronto è emerso che, oltre al contenuto di argilla, anche la presenza di scheletro influisce in modo rilevante sulla misura dei contenuti idrici in quanto si modifica la risposta del sensore, che pertanto dovrebbe essere oggetto di calibrazione sito-specifica.

L'analisi delle caratteristiche della chioma delle piante presenti in campo ha evidenziato come periodicamente avvengano fenomeni che incidono fortemente sullo sviluppo della porzione della chioma esposta ai venti caldi provenienti dai quadranti meridionali, soprattutto durante il primo periodo di sviluppo dei germogli, maggiormente suscettibili a disidratazione. Nel biennio di osservazione infatti, durante il periodo primaverile si sono verificate periodiche raffiche di vento caldo con provenienza dai quadranti meridionali, che hanno danneggiato la nuova vegetazione e rallentato la crescita delle porzioni della chioma maggiormente esposte ed hanno compromesso la produzione determinando un'elevata cascola dei frutti.

L'uso della subirrigazione ha permesso il contenimento dei volumi irrigui rispetto al tradizionale impianto a spruzzo frequentemente utilizzato nell'areale, con percentuali medie di risparmio idrico nel biennio 2018-2019 rispettivamente pari al 12,6% e 14,0% per le tesi mantenute in assenza di deficit idrico (FI) ed al 43,6% e 35,3% per le tesi mantenute in condizioni di deficit durante la fase II dello sviluppo della pianta (DI).

In entrambi gli anni di osservazione, nonostante i maggiori volumi irrigui forniti con il tradizionale impianto a spruzzo (TI) rispetto alle parcelle in subirrigazione (FI e DI), i valori di potenziale in TI hanno evidenziato, soprattutto nei giorni antecedenti gli adacquamenti, livelli di

stress da moderato ad elevato. I livelli di stress in TI sono risultati confrontabili, se non addirittura maggiori, rispetto ai corrispondenti rilevati in DI. Tuttavia, in relazione al diverso turno irriguo ed ai maggiori volumi forniti in TI, dopo ciascun adacquamento, le condizioni idriche della pianta sono state ripristinate, tanto da riportare i valori di potenziale (Ψ_{pd} , Ψ_{stem}) a valori simili a quelli misurati in FI.

Gli effetti sulla crescita della vegetazione nelle diverse modalità di gestione irrigua, hanno evidenziato come nel 2018, la riduzione del numero di germogli estivi nella tesi DI sia risultato più accentuato e pari a circa la metà rispetto a quello riscontrato nelle altre tesi irrigue poiché, a causa delle progressive condizioni di deficit idrico, si è manifestata una riduzione dei flussi di crescita. Analoghi risultati sono stati ottenuti nel 2019: la tesi DI, nella quale le condizioni di deficit idrico si sono protratte per tutto luglio ed agosto, ha manifestato percentuali di germogliamento estivo minori rispetto alle altre tesi irrigue. Le percentuali di germogliamento estivo in TI, sono risultate intermedie tra DI ed FI. Nello specifico, nonostante i maggiori volumi di adacquamento forniti in TI rispetto ad FI, le periodiche condizioni di stress alle quali è stata soggetta la tesi irrigua hanno determinato una minore quantità di germogli estivi.

I rilievi effettuati utilizzando la rete di sensori installati in campo hanno permesso di identificare le soglie di intervento irriguo al di sotto delle quali iniziano a verificarsi condizioni di stress idrico nella pianta. Nello specifico, è stato possibile verificare che l'insorgenza di condizioni di stress idrico si determina in corrispondenza a valori del potenziale predawn, Ψ_{pd} , pari a -0,45 MPa per tutti i siti di misura e indipendentemente dall'eterogeneità delle caratteristiche fisiche del suolo. In corrispondenza di tale valore soglia, sono stati misurati valori di Ψ_{stem} , compresi tra -1,2 e -1,4 MPa.

Il monitoraggio continuo del potenziale mediante gli psicrometri posizionati sulle branche, ha permesso di identificare, uno ritardo temporale di circa 2-3 ore rispetto al massimo teorico che si dovrebbe manifestare prima del sorgere del sole e misurato con la camera di Scholander sul germoglio. In modo simile, il valore minimo dei potenziali, registrato dai sensori intorno alle 16:00, è stato caratterizzato dallo stesso ritardo temporale (2-3 ore) rispetto alle misure Ψ_{stem} . Confrontando i due distinti metodi di misura, è emerso che nelle tesi irrigue mantenute in assenza di stress i valori di potenziale risultano abbastanza sovrapponibili. Per la tesi FI, infatti, i valori misurati dallo strumento, durante le ore più calde della giornata, assumono valori più bassi

rispetto a quelli misurati con la camera a pressione, verosimilmente, data la non limitazione del rifornimento idrico e la maggiore conduttività idraulica dei tessuti, il potenziale misurato con gli psicrometri può rispecchiare il potenziale della foglia pienamente traspirante. Di contro, nelle tesi mantenute in condizioni di deficit idrico sono risultate delle marcate differenze tra i valori di potenziale. L'origine di tali differenze è da ricercarsi nella posizione relativa dei due punti di misura, oltre che da elementi che riguardano sia la conduttività della pianta, che il manifestarsi di fenomeni embolia in condizioni di deficit idrico prolungato.

Nel periodo di applicazione del deficit irriguo, i flussi traspirativi a scansione oraria misurati mediante *sap-flow* sono risultati in DI, come atteso, sempre inferiori ad FI con effetti più marcati nel 2019. La densità di flusso è risultata fortemente dipendente dalla richiesta evapotraspirativa dell'atmosfera, espressa mediante la variabile ETo, con incrementi molto rapidi fino a valori di ETo prossimi a 0,2 mm/h, in dipendenza della richiesta evapotraspirativa dell'atmosfera. Per i valori maggiori di ETo, l'incremento dei valori di densità di flusso è risultato più limitato in relazione al limite fisico derivante dallo stato idrico della pianta (disponibilità idrica, conduttività idraulica dei tessuti, superficie fogliare coinvolta nei processi traspirativi, ecc.).

Il rapporto tra i flussi traspirativi giornalieri misurati in FI e l'evapotraspirazione delle coltura di riferimento ha permesso di stimare, per entrambe le stagioni irrigue, corrispondenti alla fase intermedia di sviluppo della pianta, valori del coefficiente colturale basale $K_{cb}=0,40$ nel 2018 e nel 2019. Inoltre, la misura dei flussi traspirativi eseguita nelle tesi mantenute in condizioni di deficit idrico, ha permesso di stimare i valori assunti dal coefficiente di stress K_s che, nei due anni, è risultato pari a 0,75 e 0,57.

Ulteriori indagini si rendono tuttavia necessarie al fine di valutare gli effetti di lungo periodo delle condizioni di deficit idrico applicate nel biennio in modo da verificare se il minore sviluppo vegetativo estivo che ne è conseguito possa influenzare le produzioni future.

Bibliografía

- Aboukhaled, A., Alfaro, A., & Smith, M. (1982). "Lysimeters". Irrigation and Drainage Paper, 39.
- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., & Smith M. (1998). "Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements". FAO Irrigation and Drainage Paper, 56, Rome, Italy.
- Allen R.G., & Pereira L.S. (2009). "Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height". Irrigation Science, 28, pp. 17–34.
- Ayars, J.E., Phene, C.J., Hutmacher, R.B., Davis, K.R., Schoneman, R.A., Vail, S.S., & Mead, R.M. (1999). "Subsurface drip irrigation of row crops: a review of 15 years of research at the Water Management Research Laboratory". Agricultural Water Management, 42:1-27.
- ASABE Standards. 2001 S526.2: Soil and water terminology. St. Joseph, Mich.: ASABE.
- Balbastre Peralta I., Sanchis Alos L., Royuela Tomás A., Arviza Valverde J., Turegano Pastor J.V. (2015). "Desarrollo Y Calibración Del Banco De Ensayo Para Emisores De Riego Localizado Del Laboratorio De Hidráulica Y Riegos (LHIR) DE LA UPV", XXXIII Congreso Nacional de Riegos.
- Ballester, C., Castel, J., Abd El-Mageed, T.A., Castel, J.R., & Intrigliolo, D.S. (2014). "Long-term response of 'Clementina de Nules' citrus trees to summer regulated deficit irrigation". Agricultural Water Management, 138:78-84.
- Beeson, R.C. (2011). "Weighing lysimeter systems for quantifying water use and studies of controlled water stress for crops grown in low bulk density substrates". Agricultural Water Management, 98:967-976.
- Bralts, V. F., Wu, I. P., & Gitlin, H. M. (1981 a). "Manufacturing variation and drip uniformity." Trans. ASAE, 24:113–119.
- Bralts VF, Wu I, Gitlin HM (1981 b) "Drip irrigation uniformity considering emitter plugging". Trans ASABE 24:1234–1240.
- Braun, P. & J. Schmid. (1999). "Sap flow measurement in grapevines (*Vitis vinifera* L.) 2. Granier measurements". Plant Soil, 215:47-55.
- Bounoua, S., Tomas, S., Labille, J., Molle, B., Granier, J., Haldenwang, P., & Izzati, S. N. (2016). "Understanding physical clogging in drip irrigation: in situ, in-lab and numerical approaches". Irrigation science, 34:327-342.

- Bucks, D.A., Nakayama, F.S., & Gilbert, R.G., (1979). "Trickle irrigation, water quality and preventive maintenance". *Agricultural Water Management*, 2:149-162.
- Burgess, S.S.O., Adams, M.A. & Bleby, T.M., 2000. "Measurement of sap flow in roots of woody plants: a commentary". *Tree Physiology*, 20.
- Burgess, S.O., M.A. Adams, N.C. Turner, C.R. Beverly, C. Ong, A.A. Khan & T.M. Bleby. (2001). "An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants". *Tree Physiology*. 21:589-598.
- Burman R.D., Wright J.L., Nixon P.R., & Hill R.W. (1980a). "Irrigation management-water requirements and water balance", In: *Irrigation, Challenges of the 80's*, Proc. of the Second National Irrigation Symposium. ASAE 141-153.
- Burman, R.D., Nixon P.R., Wright J.L., & Pruitt W.O. (1980b). "Water requirements", In: Jensen, M.E. (Ed.), *Design of Farm Irrigation Systems*. ASAE 189-232.
- Burt, C. M., and S. W. Styles. (2007). "Drip and Micro Irrigation Design and Management for Trees, Vines, and Field Crops: Practice plus Theory". San Luis Obispo, Cal.: Cal Poly ITRC.
- Cabibel, B., Do, F., & Horoyan, J. (1991). "Mesures thermiques des flux de sève dans les troncs et les racines et fonctionnement hydrique des arbres. I. Analyse théorique des erreurs sur la mesure des flux et validation des mesures en présence de gradients thermiques extérieurs".
- Capra, A., Scicolone, B. (1998). "Water quality and distribution uniformity in drip/trickle irrigation systems". *Journal of Agricultural Engineering Research*, 70:355-365.
- Capra, A., Consoli, S., & Scicolone, B. (2008). "Water management strategies under deficit irrigation". *Journal of Agricultural Engineering*, 39:27-34.
- Castellarin, S.D., Matthews, M.A., Di Gaspero, G., & Gambetta, G.A. (2007). "Water deficit accelerate ripening and induce changes in gene expression regulating flavonoid biosynthesis in grape berries". *Planta*, 227:101-112.
- Cermak, J., J. Kucera & N. Nadezhdina. (2004). "Sap flow measurements with some thermodynamic methods, flow integration within trees and scaling up from sample trees to entire forest stands". *Trees*, 18:529-546.
- Chalmers, D. J. (1981). "Control of peach tree growth and productivity by regulated water supply, tree density, and summer pruning". *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 106:307-312.

- Clearwater, M. J., & Goldstein, G. (2005). "Embolism repair and long distance water transport". In *Vascular transport in plants*, 375-399
- Dane J.H., & Hopmans J.W. (2002). "Water retention and storage. Laboratory methods: pressure plate extractor", in Dane J. H., Topp G. C., *Methods of Soil Analysis, Physical Methods, Part 4*, Madison, 255-293.
- De Camargo, A. P., Molle, B., Tomas, S., & Frizzone, J. A. (2014). "Assessment of clogging effects on lateral hydraulics: proposing a monitoring and detection protocol". *Irrigation science*, 32:181-191.
- Dixon, M. A., & Tyree, M. T. (1984). "A new stem hygrometer, corrected for temperature gradients and calibrated against the pressure bomb". *Plant, Cell & Environment*, 7:693-697.
- Do, F. & A. Rocheteau. (2002a). "Influence of natural temperature gradients on measurements of xylem sap flow with thermal dissipation probes. 1. Field observation and possible remedies". *Tree Physiology*. 22:641-648.
- Do, F. & A. Rocheteau. (2002b). "Influence of natural temperature gradients on measurements of xylem sap flow with thermal dissipation probes. 2. Advantages and calibration of a non-continuous heating system". *Tree Physiology*. 22:649-654.
- Do, F. C., Isarangkool Na Ayutthaya, S., & Rocheteau, A. (2011). "Transient thermal dissipation method for xylem sap flow measurement: implementation with a single probe". *Tree Physiology*, 31:369-380.
- Do, F. C., Puangjumpa, N., Rocheteau, A., Duthoit, M., Nhean, S., & Isarangkool Na Ayutthaya, S. (2018). "Towards reduced heating duration in the transient thermal dissipation system of sap flow measurements". *Acta Horticulturae*, 1222:149-154.
- Doorenbos J., Pruitt W.O. (1975). "Guidelines for predicting crop water requirements". *Irrigation and Drainage Paper no. 24*, FAO-ONU, Rome, Italy.
- Doorenbos J., Pruitt W.O. (1977). "Guidelines for predicting crop water requirements". *FAO-ONU, Rome, Irrigation and Drainage Paper no. 24*.
- Evet, S. R., & Steiner, J. L. (1995). "Precision of neutron scattering and capacitance type soil water content gauges from field calibration". *Soil Science Society of America Journal*, 59:961-968.

- Evett, S. R., Schwartz, R. C., Tolk, J. A., & Howell, T. A. (2009). "Soil profile water content determination: Spatiotemporal variability of electromagnetic and neutron probe sensors in access tubes". *Vadose Zone Journal*, 8:926-941.
- Ferré P.A., & Topp G.C. (2002). "Time domain reflectometry". In *Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Methods*. Madison, Wisconsin, pp. 434-446.
- Gardner W.R., Kirkham D. (1952). "Determination of soil moisture by neutron scattering". *Soil Science*, 73:391-401.
- Gardner, W.H. (1986). "Water content". In: *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods* (Klute, A., ed). Agronomy Series No. 9. American Society of Agronomy, 2nd edition, pp. 493-544.
- Granier, A. (1985). "Une nouvelle méthode pour la mesure des flux de sève dans le tronc des arbres". *Annals of Forest Science*, 42:193-200.
- Granier, A. (1987). "Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements". *Tree Physiology* 3:309-320.
- Green, S. R., & Clothier, B. E. (1988). "Water Use of Kiwifruit Vines and Apple Trees by the Heat-Pulse Technique". *Journal of Experimental Botany*, 39:115-123.
- Hacke, U. G., & Sperry, J. S. (2001). "Functional and ecological xylem anatomy". *Perspectives in plant ecology, evolution and systematics*, 4:97-115.
- Han, S., Li, Y., Xu, F., Sun, D., Feng, J., Liu, Z., ... & Wang, Z. (2018). "Effect of lateral flushing on emitter clogging under drip irrigation with Yellow River water and a suitable method". *Irrigation and Drainage*, 67:199-209.
- Hanson, B., Schwankl L., Grattan S. R., & Prichard T. (1997). "Drip irrigation for row crops". Davis, Cal.: University of California Cooperative Extension.
- Intrigliolo, D. S., Ballester, C., & Castel, J. R. (2013). "Carry-over effects of deficit irrigation applied over seven seasons in a developing Japanese plum orchard". *Agricultural Water Management*, 128:13-18.
- Isarangkool Na Ayutthaya, S.I.N., Do F.C., Pannengpetch K., Junjittakarn J., Maeght J.L., Rocheteau A., & Cochard H. (2010). "Transient thermal dissipation method of xylem sap flow measurement: multi-species calibration and field evaluation". *Tree Physiology*, 30:139-148.

ISO 9261:2010 Agricultural irrigation equipment - Emitters and emitting pipe - Specification and test methods.

Jobling, J. J., Patterson, B. D., Moradi, S., & Joyce, D. (1997). "A non-destructive method for measuring the water potential of fruit and vegetables". *Postharvest Biology and Technology*, 10:1-8.

Kennedy, J.A., Matthews, M.A., & Waterhouse, A.L. (2002). "Effect of maturity and vine water status on grape skin and wine flavonoids". *American Journal of Enology and Viticulture*, 53:268-274.

Lamm, F.R. (2002). "Advantages and disadvantages of subsurface drip irrigation". In *International Meeting on Advances in Drip/Micro Irrigation*, Puerto de La Cruz, Tenerife, Canary Islands.

Lamm, F. R., & C. R. Camp. (2007). "Chapter 13: Subsurface drip irrigation". In *Microirrigation for Crop Production: Design, Operation, and Management*, 473-551.

Lamm, F. R., D. H. Rogers, M. Alam, D. M. O'Brien, & T. P. Trooien. (2009). "Twenty years of progress with SDI in Kansas". ASABE Paper No. 095923. St. Joseph, Mich.: ASABE.

Lamm, F. R., Bordovsky, J. P., Schwankl, L. J., Grabow, G. L., Enciso-Medina, J., Peters, R. T., ... & Porter, D. O. (2012). "Subsurface drip irrigation: Status of the technology in 2010". *Transactions of the ASABE*, 55:483-491.

Lamm, F. R., O'Brien, D. M., & Rogers, D. H. (2015). "Economic comparison of subsurface drip and center-pivot sprinkler irrigation using spreadsheet software". *Appl. Eng. Agric.*, 31:929-936.

Lamm, F. R., & Rogers, D. H. (2017). "Longevity and performance of a subsurface drip irrigation system". *Transactions of the ASABE*, 60:931-939.

Li, Q., Song, P., Zhou, B., Xiao, Y., Muhammad, T., Liu, Z., ... & Li, Y. (2019). "Mechanism of intermittent fluctuated water pressure on emitter clogging substances formation in drip irrigation system utilizing high sediment water". *Agricultural Water Management*, 215:16-24.

Liu, H., & Huang, G. (2009). "Laboratory experiment on drip emitter clogging with fresh water and treated sewage effluent". *Agricultural Water Management*, v.96, p.745-756:2009.

Lu, P., Urban, L., & Zhao, P. (2004). "Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice". *Acta Botanica Sinica*, 46:631-646.

- Lubczynski, M. W., Chavarro-Rincon, D., & Roy, J. (2012). "Novel, cyclic heat dissipation method for the correction of natural temperature gradients in sap flow measurements. Part 1. Theory and application". *Tree physiology*, 32:894-912.
- Marañón-Jiménez, S., Van den Bulcke, J., Piayda, A., Van Acker, J., Cuntz, M., Rebmann, C., & Steppe, K. (2017). "X-ray computed microtomography characterizes the wound effect that causes sap flow underestimation by thermal dissipation sensors". *Tree physiology*, 38: 287-301.
- Martínez-Gimeno M.A., Bonet L., Provenzano G., Badal E., Intrigliolo D.S., & Ballester C. (2018). "Assessment of yield and water use efficiency of Clementine trees under surface and subsurface drip irrigation" *Agricultural Water Management* 206.
- Mitchell, P. D., & Chalmers, D. J. (1982). "The effect of reduced water supply on peach tree growth and yields [Irrigation levels]". *Journal American Society for Horticultural Science*.
- Monteith, J.L., 1965. "Evaporation and Environment". 19th Symposia of the Society for Experimental Biology, University Press, Cambridge, 19:205-234.
- Nakayama, F. S., & Bucks, D. A. (1981). "Emitter clogging effects on trickle irrigation uniformity". *Transactions of the ASAE*, 24:77-0080.
- Nakayama, F. S., & Bucks, D. A. (1986). "Trickle Irrigation for Crop Production". Design, Operation and Management. Ed. Elsevier: Amsterdam, Netherlands.
- Nhean, S., Isarangkool Na Ayutthaya, S., Rocheteau, A., & Do, F. C. (2019). "Multi-species test and calibration of an improved transient thermal dissipation system of sap flow measurement with a single probe". *Tree physiology*. 39:1061-1070.
- Niu, W., Liu, L. & Chen X. (2013). "Influence of fine particle size and concentration on the clogging of labyrinth emitters". *Irrigation Science*, 31:545-555.
- Norman, J. M., & Campbell, G. S. (1989). "Canopy structure". In *Plant physiological ecology*, 301-325
- Ortuno, M. F., García-Orellana, Y., Conejero, W., Ruiz-Sánchez, M. C., Alarcón, J. J., & Torrecillas, A. (2006). "Stem and leaf water potentials, gas exchange, sap flow, and trunk diameter fluctuations for detecting water stress in lemon trees". *Trees*, 20:1-8.
- Paltineanu, I. C., & Starr, J. L. (1997). "Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: Laboratory calibration." *Soil Science Society of America Journal*, 61:1576-1585.

- Panigrahi, P., Sharma, R. K., Hasan, M., & Parihar, S. S. (2014). "Deficit irrigation scheduling and yield prediction of 'Kinnow' mandarin (*Citrus reticulata* Blanco) in a semiarid region". *Agricultural Water Management*, 140:48-60.
- Pérez, E. M. M., Barrio, J. J. C., García, T. S. C., & Seijo, X. X. N. (2011). "Use of psychrometers in field measurements of plant material: accuracy and handling difficulties". *Spanish journal of agricultural research*, 1:313-328.
- Phene, C. J., Davis, K. R., Hutmacher, R. B., Bar-Yosef, B., Meek, D. W., & Misaki, J. (1991). "Effect of high frequency surface and subsurface drip irrigation on root distribution of sweet corn". *Irrigation Science*, 12:135-140.
- Pinto M.F., Molle B., Alves D.G., Mouheb N.A., & Camargo A.P. (2017). "Flow rate dynamics of pressure-compensating drippers under clogging effect". *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (Brazilian Journal of Agriculture and Environmental Engineering)* 21: 304-309.
- Pisciotta, A., Di Lorenzo, R., Santalucia, G., & Barbagallo, M. G. (2018). "Response of grapevine (Cabernet Sauvignon cv) to above ground and subsurface drip irrigation under arid conditions". *Agricultural Water Management*, 197:122-131.
- Poggi, I., Polidori, J. J., Gandoin, J. M., Paolacci, V., Battini, M., Albertini, M., ... & Cochard, H. (2007). "Stomatal regulation and xylem cavitation in Clementine (*Citrus clementina* Hort) under drought conditions". *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 82:845-848.
- Provenzano, G., Rodriguez-Sinobas, L., & Roldán-Cañas, J. (2014). "Irrigated agriculture: Water resources management for a sustainable environment". *Biosystems Engineering*, 128:1-3.
- Provenzano G., Rallo G., & Ghazouani H. (2015). "Assessing Field and Laboratory Calibration Protocols for the Diviner 2000 Probe in a Range of Soils with Different Textures". *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 10.
- Provenzano, G., Franco L., Camboni F. & Toker J. (2018). "Implementing a cyber-physical system to monitor soil water status and environmental variables for irrigation scheduling". *EGU General Assembly Conference Abstracts Vol. 20*, p. 12636.
- Rallo, G., Agnese, C., Minacapilli, M., & Provenzano, G. (2011). "Comparison of SWAP and FAO agro-hydrological models to schedule irrigation of wine grapes". *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138:581-591.

- Ravina, I., Paz, E., Sofer, Z., Marcu, A., Shisha, A., & Sagi, G. (1992). "Control of emitter clogging in drip irrigation with reclaimed wastewater". *Irrigation Science*, 13:129-139.
- Ravina, I., Paz, E., Sofer, Z., Marcu, A., Schischa, A., Sagi, G., Yechialy, Z., & Lev, Y. (1997). "Control of clogging in drip irrigation with stored treated municipal sewage effluent". *Agricultural Water Management*, 33:127-137.
- Reyes-Acosta, J. L., Vandegheuchte, M. W., Steppe, K., & Lubczynski, M. W. (2012). "Novel, cyclic heat dissipation method for the correction of natural temperature gradients in sap flow measurements. Part 2. Laboratory validation". *Tree physiology*, 32:913-929.
- Robinson D.A., Campbell C.S., Hopmans J.W., Hornbuckle B.K., Jones R., Knight F., Ogden J., & Wendroth O. (2008). "Soil Moisture Measurement for Ecological and Hydrological Water-Scale Observatories: a review". *Vadose Zone Journal*, 7:358-389.
- Romanucci V., Landhari A., De Tommaso G., De Marco A., Di Marino C., Di Fabio G., & Zarrelli A., (2018). "Phytotoxic extract as a possible additive in subsurface irrigation drip for organic agriculture". *Journal of environmental accounting and management*, 6:335-343.
- Sinobas, L. R., & Rodríguez, M. G. (2012). "A review of subsurface drip irrigation and its management". *Water Quality, Soil and Managing Irrigation of Crops*, 171-194.
- Schenk, H. J. (2012). "Formation and repair of xylem embolisms: Current state of knowledge and implications for irrigation of horticultural crops". In *VII International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops*, 1038:311-325.
- Scholander, P. F., Bradstreet, E. D., Hemmingsen, E. A., & Hammel, H. T. (1965). "Sap pressure in vascular plants: negative hydrostatic pressure can be measured in plants". *Science*, 148: 339-346.
- Schifris, S., Schweitzer, A., Matan, E., & Borkow, G. (2015). "Inhibition of root penetration in subsurface driplines by impregnating the drippers with copper oxide particles". *Irrigation science*, 33:319-324.
- Smith, D.M. & S.J. Allen. 1996. "Measurement of sap flow in plant stems". *Journal of Experimental Botany*, 47:1833-1844.
- Soltys, D., Rudzińska-Langwald, A., Gniazdowska, A., Wiśniewska, A., & Bogatek, R. (2012). "Inhibition of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) root growth by cyanamide is due to altered cell division, phytohormone balance and expansin gene expression". *Planta*, 236: 1629-1638

- Spanner, D. C. (1951). "The Peltier effect and its use in the measurement of suction pressure". *Journal of Experimental Botany*, 145-168.
- Stoochnoff, J. A., Graham, T., & Dixon, M. A. (2018). "Drip irrigation scheduling for container grown trees based on plant water status". *Irrigation science*, 36:179-186.
- Suarez-Rey, E. M., Choi, C. Y., McCloskey, W. B., & Kopec, D. M. (2006). "Effects of chemicals on root intrusion into subsurface drip emitters". *Irrigation and Drainage*, 55:501-509.
- Swanson, R.H. (1994). "Significant historical developments in thermal methods for measuring sap flow in trees". *Agricultural and Forest Meteorology*, 72:113-132.
- Van der Gulik, T.W., (1999). "Trickle Irrigation Manual". Abbotsford, British Columbia, Canada: Irrigation Association of British Columbia.
- Van Genuchten M.Th., (1980). "A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils". *Soil Science Society of America Journal*, 44:892-898.
- Turner, M.T., & Jarvis, G.P., (1982). "Measurement of plant water status by the pressure chamber technique". *Irrigation Science*, 9:289-308.
- Watson, D. J., (1947). "Comparative physiological studies on growth of crops. I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties and between years". *Annals of Botany*, 11:41-76.
- Walter J.M. & Torquebiau E., (2000). "The computation of forest leaf area index on slope using ftsh-eye sensors". *Compte-Rendu de l'Académie des Sciences, Paris. Life Sciences*, 323 :801-813.
- Wei, Q., Shi, Y., Lu, G., Dong, W., & Huang, S., (2008). "Rapid evaluations of anticlogging performance of drip emitters by laboratorial short-cycle tests". *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 134:298-304.
- Zazueta, F. S., & Xin, J., (1994). "Soil moisture sensors". *Soil Science*, 73:391-401
- Zhang L., Wu P., Zhu D. & Zheng C., (2017). "Effect of pulsating pressure on labyrinth emitter clogging". *Irrigation Science* 35:267-274.

La borsa di dottorato è stata cofinanziata con risorse del
Programma Operativo Nazionale Ricerca e Innovazione 2014-2020 (CCI 2014IT16M2OP005),
Fondo Sociale Europeo, Azione I.1 "Dottorati Innovativi con caratterizzazione Industriale"



UNIONE EUROPEA
Fondo Sociale Europeo



*Ministero dell'Istruzione,
dell'Università e della Ricerca*

